

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки  
Кафедра електронних приладів та пристроїв**

**До захисту допущено**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д.Писаренко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки **6.050802 – Електронні пристрої та системи**  
на тему **«Волоконно-оптичний датчик акустичного поля»**

**Виконав:**

Студент 4 курсу, гр. ДЕ-351 **Прокопенко М.В.**

\_\_\_\_\_

**Керівник:**

Доцент кафедри ЕП та П, к.т.н. **Чадюк В.О.**

\_\_\_\_\_

Нормоконтроль:

Доцент кафедри ЕП та П, к.т.н. **Чадюк В.О.**

\_\_\_\_\_

Рецензент:

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій бакалаврській  
роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ-2019

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Факультет електроніки**

Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.050802 –

Електронні пристрої та системи (Електронні прилади та пристрої)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_Л.Д.Писаренко

«\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломну роботу студенту

**Прокопенко Максиму Вадимовичу**

**1. Тема роботи «Волоконно-оптичний датчик акустичного поля»**

і керівник роботи Чадюк В'ячеслав Олексійович доцент кафедри ЕП та П, к.т.н., затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р., № 1406-с

**2. Термін подання студентом роботи : «\_\_\_» \_\_\_\_\_2019 р.**

**3. Вихідні дані до роботи:** Розроблено теоретичний макет та структурну схему пристрою для реєстрації акустичних коливань з певними технічними характеристиками. Наведено результати роботи (схеми, макети). Виконана робота є актуальною і може бути використана для реалізації пристрою

**4. Зміст роботи:** Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури по волоконно-оптичних датчиках акустичного поля (характеристики, принципи побудови, різновиди); теоретична частина (фізичний принцип роботи та математична модель); висновки; список використаної літератури.

**5. Перелік ілюстративного матеріалу:** Складальне креслення, схематичні зображення, функціональні схеми, структурні схеми; плакати з формулами, графіками та висновками.

**6. Дата видачі завдання:**

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

<b>№ з/ п</b>	<b>Назва етапів виконання дипломної роботи</b>	<b>Термін виконання етапів роботи</b>	<b>Примітка</b>
1	Огляд науково-технічної літератури по волоконно-оптичних датчиках акустичних полів(характеристики, принципи побудови, різновиди)	20.03.2019	виконано
2	Дослідження фізико-математичної моделі	30.03.20189	виконано
3	Розробка структурної, функціональної, електричної принципової схеми	10.04.2019	виконано
4	Математична модель датчика	25.04.2019	виконано
4	Методики аінженерного розрахунку	10.04.2019	виконано
5	Оформлення графічної частини, пояснювальної записки, плакатів, підготовка доповіді	25.05.2019	виконано

Студент гр. ДЕ-351  
Керівник роботи

М.В. Прокопенко  
В.О. Чадюк

[illegible]

**Пояснювальна записка  
до дипломної роботи**

на тему: «Волоконно-оптичний датчик  
акустичного поля»

Київ - 2019

## **Р Е Ф Е Р А Т**

### **«Волоконно-оптичний датчик акустичного поля»**

Дипломна робота освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» напрямку підготовки 6.050802 – Електронні пристрої та системи. **Прокопенко Максим Вадимович**. НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського. Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-351. – К.: НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 69с., іл. 37.

**Короткий зміст роботи:** В дипломній роботі розглянуто сучасні волоконно-оптичні датчики, методи виявлення та вимірювання акустичних коливань, механізми, фільтрації та обробки. Крім того, висвітлено питання запису решітки Брегга.

Розроблено теоретичний макет та структурну схему пристрою для реєстрації акустичних коливань з певними технічними характеристиками. Наведено результати роботи (схеми, макети). Виконана робота є актуальною і може бути використана для реалізації пристрою.

**Ключові слова:** волоконно-оптичний датчик, акустичне поле, гідроакустика, решітка Брегга.

## **АНОТАЦІЯ**

Об'єктом дослідження є волоконно-оптичний датчик акустичного поля. Дослідження полягає у розробці макету пристрою і структурної схеми. Предметом дослідження є вдосконалення структури волоконно-оптичних датчик акустичного поля.

Задачі, вирішені для досягнення мети, наступні: досліджена існуюча база волоконно оптичних датчиків та проаналізовано їх на предмет можливості вдосконалення як систем в цілому, так і їх окремих частин; розроблений макет гідроакустичної антени. Виконання завдань вказує на можливість створення таких датчиків на основі бреггівських решіток. Можливі напрямки для подальших досліджень може включати в себе: експериментальні тести моделі.

## **SUMMARY**

The object of the study is a fiber-optic acoustic field sensor. The research is to develop the layout of the device and the structural scheme. The subject of the study is to improve the structure of the fiber-optic acoustic field sensor.

The tasks solved for the purpose are as follows: the existing base of fiber-optic sensors was investigated and analyzed for the possibility of improving both systems in general and their individual parts; developed a layout of the hydroacoustic antenna. Completing tasks indicates the possibility of creating such sensors based on Bragg's grids. Possible areas for further research may include: experimental model tests.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ І. ОГЛЯД НАУКОВО – ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	
ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКАХ АКУСТИЧНОГО	
ПОЛЯ.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
1.1. Огляд волоконно-оптичних акустичних датчиків.....	11
1.1.1. Волоконно-оптичні акустичні датчики, утворені на інтерферометрі	
Маха-Цендера.....	11
1.1.2. Волоконно-оптичні акустичні датчики, створені на інтерферометрі	
Майкельсона.....	14
1.1.3. Волоконно-оптичні акустичні сенсори, засновані на	
інтерферометрі Саньяка.....	18
1.1.4. Волоконно-оптичні акустичні сенсори, засновані на	
інтерферометрі Фабрі-Перо.....	19
1.2. Волоконні бреггівські решітки.....	20
1.2.1. Основні властивості волоконних бреггівських решіток.....	20
1.2.2. Фоточутливість оптичного волокна.....	25
1.2.4. Основні методи запису волоконних бреггівських решіток.....	29
1.3 Висновки.....	38
РОЗДІЛ ІІ. КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО	
ДАТЧИКА НА ОСНОВІ БРЕГГІВСЬКИХ РЕШІТОК.....	39
2.1. Принцип дії волоконно-оптичного сенсора на бреггівських решітках.....	39
2.2. Розрахунок і побудова моделі інтерферометра Тальбота для запису	
волоконних бреггівських решіток.....	42
2.3 Висновки.....	46

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<b>Волоконно-оптичний</b> <b>датчик акустичного</b> <b>поля</b>		
Розроб.		Пракопенко М.В.					
Перевір.		Чадюк В.О.					
Н. Контр.		Чадюк В.О.					
Затверд.		Писаренко Л.Д.					
					Літ.	Арк.	Аркуші
						5	73
					КП, ФЕЛ, ДЕ-351		



РОЗДІЛ ІІІ. ЗАПИС РЕШІТКИ БРЕГГА В КРИСТАЛІ $\text{LiNbO}_3$ .....	47
3.1. Опис схеми запису решітки Брегга в кристал $\text{LiNbO}_3$ .....	47
3.2. Визначення меж частотної перебудови бреггівської решітки в кристалі $\text{LiNbO}_3$ .....	49
3.3 Висновки.....	53
РОЗДІЛ ІV. МАКЕТ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ ГІДРОАКУСТИЧНОЇ АНТЕНИ НА ОНОВІ БРЕГГІВСЬКИХ РЕШІТОК.....	54
4.1. Схема і основні компоненти макету волоконно-оптичної гідроакустичної антени на основі бреггівських решіток.....	56
4.2. Висновок.....	57
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

## ВСТУП

Відсутність можливості використовувати діапазон радіочастот у воді призводить до того, що для вирішення різних завдань локації і пеленгування в морі необхідно прибігати до акустичних методів.

Серед акустичних пристроїв найбільш сучасними є системи, що використовують волоконно-оптичні фазові інтерферометричні датчики. Застосування в таких системах двохпроменевозаломлюючих світловодів, масивів волоконних бреггівських решіток, сучасних методів мультиплексування і обробки інтерференційних оптичних сигналів дозволяє створювати протяжні розподілені волоконно-оптичні вимірвальні комплекси [37,38].

Добре вивчені і широко поширені акустичні датчики на п'єзокерамічних елементах, основними недоліками яких є складність їх мультиплексування і порівняно великі вагогабаритні параметри. За допомогою оптичних волокон з бреггівськими ґратами вдається вирішити задачу створення масиву чутливих елементів, що володіють високою акустичною чутливістю і необхідним динамічним діапазоном, нечутливістю до електромагнітного впливу і порівняно більш вигідними вагогабаритними характеристиками. В даний час спостерігається переозброєння гідроакустичних комплексів у флотах США і їх союзників по НАТО, де все ширше починають застосовуватися пасивні буксирувальні гідроакустичні антени з волоконно-оптичними датчиками, які використовують решітки Бреґга з низькою відбивною здатністю [34].

Все ширше застосовуються мережі стаціонарних донних волоконно оптичних гідрофонів на бреггівських решітках з метою геофізичної розвідки шельфових запасів корисних природних копалин, в тому числі нафти і газу [35, 36].

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			9

Тому, пошук шляхів створення і розробка пристроїв реєстрації акустичних сигналів із застосуванням оптичних волокон, в яких сформовані бреггівські решітки, що утворюють фазові інтерферометричні датчики, являє перспективний напрямок в області спектрального вимірювання акустичного тиску.

Незважаючи на те, що за останні роки вийшла велика кількість робіт по дослідженню волоконно-оптичних вимірювальних пристроїв з бреггівськими ґратами, створення і дослідження гідроакустичних пристроїв вимірювання акустичних спектрів, приділено недостатню увагу.

У зв'язку зі сказаним вище, метою цієї роботи є моделювання та дослідження волоконно-оптичних фазових інтерферометричних вимірювальних пристроїв на бреггівських решітках і пошук шляхів їх застосування для вирішення ряду завдань гідроакустики.

В ході виконання роботи вирішувалися наступні завдання:

1. створення концепції побудови розподіленої лінії волоконно оптичних акустичних сенсорів на основі фазових інтерферометричних датчиків на бреггівських решітках;
2. визначення шляхів технологічної реалізації процесу запису масивів бреггівських решіток в двохпроменевозаломлюючому волокні;
3. моделювання макету волоконно-оптичних гідроакустичних антен на основі фазових інтерферометричних датчиків з бреггівськими ґратами.

У даній роботі проведено дослідження волоконно-оптичних фазових інтерферометричних вимірювальних пристроїв акустичного тиску, змодельована модель волоконно-оптичної гідроакустичної антени на бреггівських решітках.

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			10

# РОЗДІЛ I. ОГЛЯД НАУКОВО – ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКАХ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ

Перший розділ присвячена огляду сучасного стану проблеми волоконно-оптичних акустичних сенсорів на фазових інтерферометричних датчиках. Проведено аналіз сучасних методів мультиплексування волоконно-оптичних акустичних чутливих елементів для створення розподілених сенсорних ліній. Сформульована мета роботи і визначені методи вирішення завдань дослідження.

## 1.1. Огляд волоконно-оптичних акустичних датчиків

### 1.1.1. Волоконно-оптичні акустичні датчики, утворені на інтерферометрі Маха-Цендера

Однією з найпоширеніших інтерферометричних схем, які використовуються для створення волоконно-оптичних акустичних сенсорів, є схема на основі інтерферометра Маха-Цендера. У схемі, показаній на малюнку 1, світло з лазера ділиться на два пучка першим волоконним перехідником, один з них йде по чутливому плечу, а інший по опорному. У разі одиночного сенсора, чутливий елемент представляє собою ділянку оптичного волокна в чутливому плечі. Друге плече забезпечує опорну фазу. У вихідному кінці другого волоконного розгалужувача ці два пучка об'єднуються і посилаються на фотодетектор, який реєструє зміну інтерференційної картини. При цьому реєструється зміна фази в чутливому плечі.

Така схема має два суттєвих недоліки [1]:

1. нестабільність робочої точки;
2. будь-які фазові шуми призводять до зміни інтенсивності реєстрованого світлового сигналу.

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			11

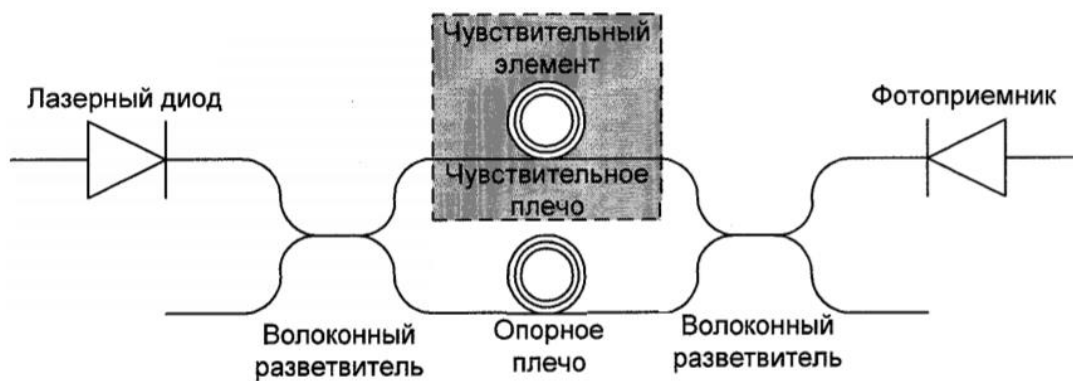


Рис.1. Схематичне зображення волоконно-оптичного акустичного сенсора, утвореного на інтерферометрі Маха-Цендера

Існують дві основні конфігурації волоконно-оптичних акустичних сенсорів на основі інтерферометра Маха-Цендера: збалансована і незбалансована [1]. У збалансованій схемою, сигнальне плече і опорна плече мають однакову довжину волокна. Ця схема широко поширена, оскільки не вимагає джерел з великою довжиною когерентності. У незбалансованій схемою довжини оптичних плечей різні.

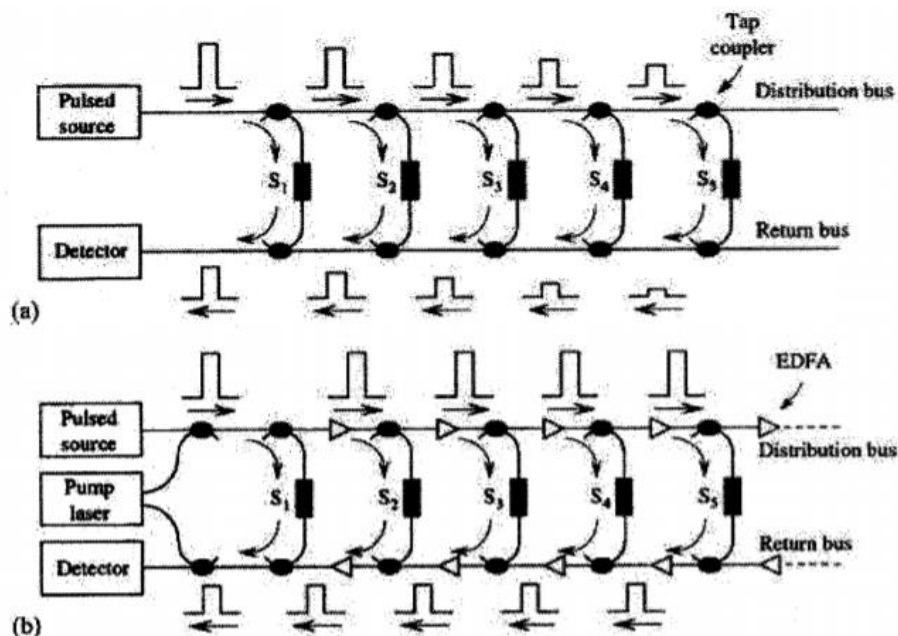


Рис. 2. Масив на інтерферометрах Маха-Цендера: а) повністю пасивний, б) з оптичними підсилювачами

Подібні масиви акустичних сенсорів обмежені в числі датчиків, які можуть бути мультиплексовані на волоконній парі через втрати поділу під час проходження через велике число розгалужень. Число сенсорів на волокно може бути максимізовано шляхом вибору коефіцієнта ділення розгалужувачів, але навіть після оптимізації таке пасивне мультиплексування може підтримувати лише 10-20 датчиків на волоконну пару.

У разі використання інтерферометра Маха-Цендера вимагає уваги той факт, що для максимальної чутливості кожен інтерферометр повинен бути зміщений в робочу точку на  $\pi/2$ . У цей же час, всі датчики будуть піддаватися впливу температури і тиску. Причому цей вплив на кожен датчик буде випадковим, що веде до періодичних завмирань інтерференційного сигналу.

Вирішити цю проблеми можливо використовуючи масив незбалансованих інтерферометрів і модуляцію частоти вхідного сигналу, а потім демодуляції зворотнього сигналу. Цей підхід добре працює, хоча і збільшує складність оброблюючої електроніки. Крім того, незбалансовані інтерферометри Маха-Цендера викликають перетворення фазового шуму джерела в шуми інтенсивності. Часто, ці шуми є переважаючими на низьких частотах, так що для отримання прийнятною чутливості на частотах нижче 1 кГц, необхідно використовувати лазери з вузькою спектральною шириною смуги випромінювання [3].

У фазових інтерферометричних датчиках необхідно контролювати стан поляризації інтерферуючих імпульсів - в іншому випадку будуть відбуватися поляризаційні втрати інтерференційного сигналу, так як, світлові хвилі з двома ортогональними поляризаціями не інтерферують.

Для компенсації втрат поділу використовують волоконні оптичні підсилювачі, які можуть використовуватися як до введення світла в масив гідрофонів, так і після отримання світлових сигналів. Цей спосіб добре працює, але суттєве збільшує число датчиків, вимагає високих вхідних потужностей, що вводяться в волокно, що неминуче призводить

до прояву нелінійних ефектів, які обмежують максимальну кількість сенсорів.

Іншим рішенням є використання безлічі оптичних підсилювачів, розміщених після кожного інтерферометра Маха-Цендера на оптичних волокнах (рис. 2 (b)). Коефіцієнт підсилення кожного підсилювача вибирається таким, щоб повністю компенсувати втрати випромінювання до наступного підсилювача. При використанні багатьох підсилювачів, всі датчики посилають на фотоприймач однакові по потужності світлові сигнали з однаковим відношенням сигнал / шум.

Так як кожен з підсилювачів володіє невеликим коефіцієнтом підсилення, то й шуми, які вони спричиняють будуть низькими, що, в результаті, значно покращує відношення сигнал / шум такої системи і дозволяє мультиплексувати більше число датчиків [3].

Розподілені сенсорні лінії з масивами датчиків, на основі інтерферометра Маха-Цендера, були успішно випробувані при дослідженні нафтових родовищ в Каліфорнії [7,8].

### **1.1.2. Волоконно-оптичні акустичні датчики, створені на інтерферометрі Майкельсона.**

Волоконно-оптичні акустичні сенсори, на основі інтерферометра Майкельсона мають дві важливі переваги над датчиками, на основі інтерферометром Маха-Цендера [1]:

1. Зв'язок з сигнальним плечем, яке розташовується віддалено від джерела і фотоприймача здійснюється тільки за допомогою одного волокна, що неможливо для інтерферометра Маха-Цендера.
2. Світловий пучок проходить через чутливе плече сенсора двічі, що робить цей тип волоконно-оптичного акустичного сенсора теоретично вдвічі більше чутливим, ніж датчик, на основі інтерферометра Маха-Цендера.

Одним із прикладів розподіленої сенсорної лінії, на основі інтерферометра Майкельсона, є система, представлена в роботі [9]. Вона складається з 32 гідрофонів, структурна схема одного з них наведена на малюнку 3:

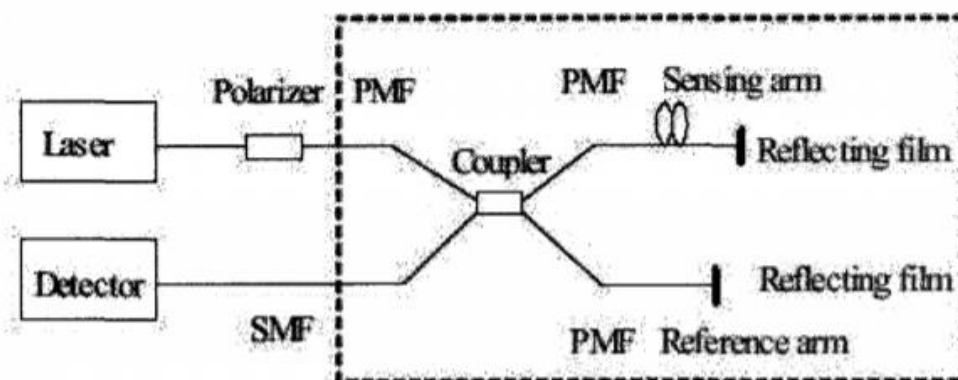


Рис. 3. Структурна схема волоконного гідрофону на основі інтерферометра Майкельсона

У конструкції волоконно-оптичного акустичного сенсора, на основі інтерферометра Майкельсона, використано волокно зі збереженням поляризації (PMP). Лінійно поляризоване випромінювання з поляризатора вводиться в інтерферометр через розгалужувач. Відмінність оптичних довжин шляхів між плечима інтерферометра (-10 м) необхідно для внесення фазового зсуву для демодуляції сигналу. Розмір елемента становить 22мм в діаметрі і 100 в довжину, а акустично чутлива частина має тільки 40 мм в довжині.

Випробування волоконно-оптичного акустичного сенсора, на основі інтерферометра Майкельсона, вироблялося в частотному діапазоні від 83 до 1250 Гц. Чутливість датчика в залежності від частоти представлена на малюнку 4:



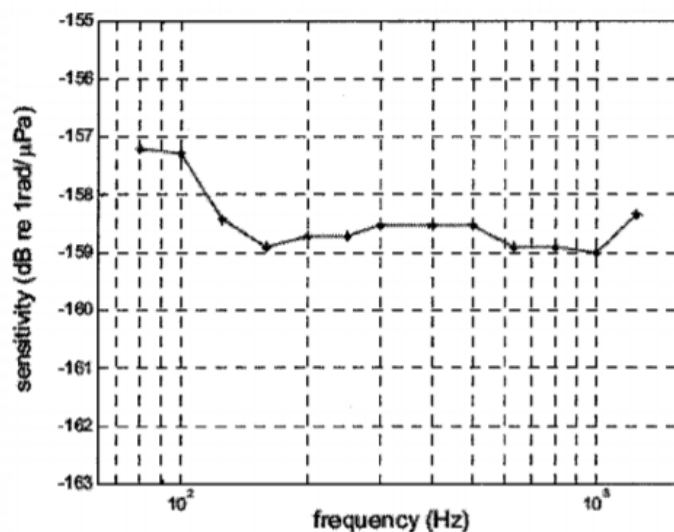


Рис. 4 Чутливість волоконно-оптичного акустичного сенсора, на основі інтерферометра Майкельсона в залежності від частоти в частотному діапазоні 83-1250 Гц

Отримана чутливість виявилася рівною  $\sim -158$  дБ в цьому частотному діапазоні з флуктуаціями менш ніж  $\pm 1.5$  дБ. При тестуванні чутливості елемента до температурних впливів в діапазоні від 0 до 50 ° С було встановлено, що флуктуації акустичної чутливості не перевищують  $\pm 2$  дБ. Також проводилося порівняння волоконно-оптичного акустичного сенсора, на основі інтерферометра Майкельсона, зі стандартним п'єзоелектричним гідрофоном (рис. 5).

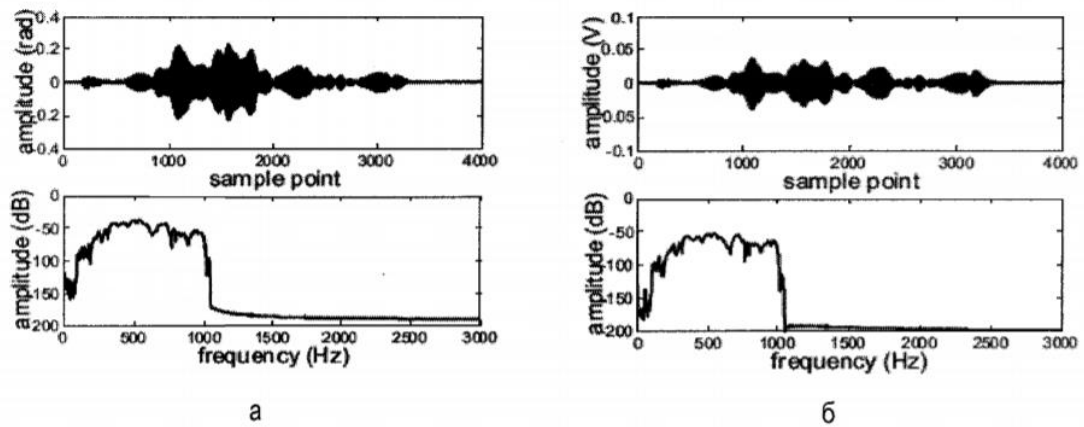


Рис. 5. Широкосмуговий акустичний сигнал і його спектр, який реєструється волоконнооптичним сенсором, на інтерферометрі Майкельсона (а), і п'єзоелектричним гідрофоном (б)

З малюнка 5 видно, що волоконний гідрофон має дуже схожу чутливість з п'єзоелектричним гідрофоном при детектуванні широкосмугового сигналу. Сконструйована на основі 32 таких датчиків розподілена сенсорна лінія була успішно випробувана, показавши аналогічну чутливість.

Інтерферометрична схема Майкельсона лежить в основі системи акустичного контролю морських портів CENTURION, що розробляється Northrop Grumman (рис. 6) [10].

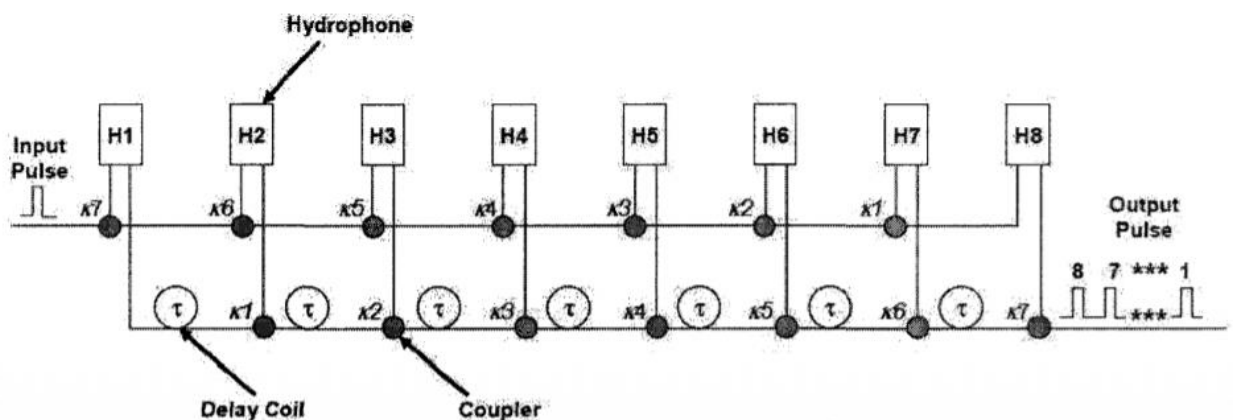


Рис. 6. Структурна схема масиву сенсорів на основі TDM.

### 1.1.3. Волоконно-оптичні акустичні сенсори, засновані на інтерферометрі Саньяка

У інтерферометрі Саньяка (рис. 7), світло з джерела входить в середній порт волоконного розгалужувача 3x3 і ділиться на пучок, що рухається за годинниковою стрілкою (CW пучок), і пучок, що рухається проти годинникової стрілки (CCW пучок). CCW пучок йде спочатку через петлю затримки і потім через чутливу частину сенсора, в той час як CW пучок проходить через чутливу частину і потім через петлю затримки [1]. Через несиметричне розташування чутливої частини, фазові зміни, які вимірювана величина вносить в чутливої частини сенсора, перетворюються в фазові відмінності між двома пучками. Ці фазові відмінності в свою чергу перетворюються в модуляцію інтенсивності, при їх інтерференції в 3x3 розгалужувачі.

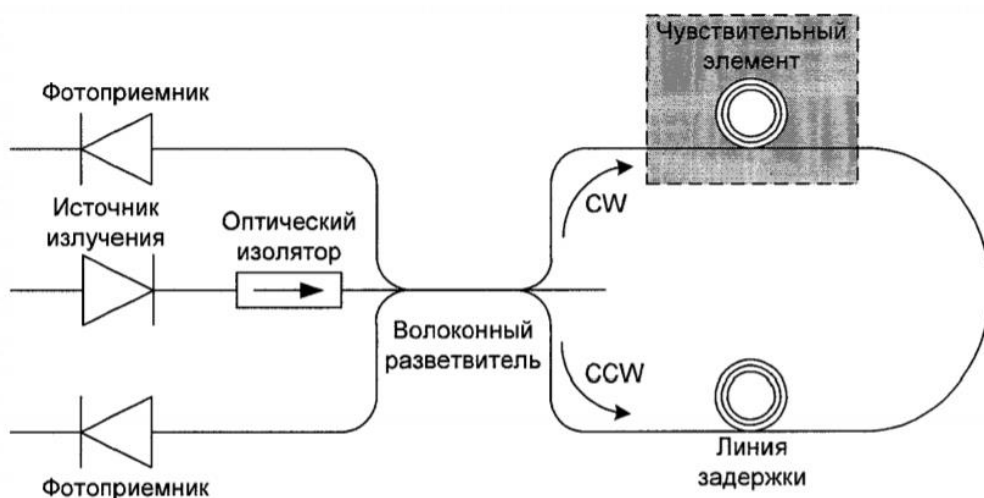


Рис. 7. Схема волоконного гідрофону на інтерферометрі Саньяка.

Волоконно-оптичний акустичний сенсор, заснований на інтерферометрі Саньяка, володіють наступними перевагами [1]: Фазовий шум оптичного джерела не перетворюється в шум інтенсивності, як в інтерферометрах Маха-Цендера і Майкельсона.

1. Можна використовувати широкосмуговий джерело випромінювання замість вузькосмугового лазерного діода.

При цьому справжня схема має істотні недоліки:

1. Волоконно-оптичний сенсор, на основі інтерферометрі Саньяка не чутливий до низьких акустичним частотам, а також
2. Виникаючі температурні градієнти всередині чутливої котушки викликають фазовий шум.

На даний момент масиви волоконно-оптичні акустичні датчики на основі інтерферометрів Саньяка добре вивчені і застосовуються для створення розподілених сенсорних ліній [13,15,16].

#### **1.1.4. Волоконно-оптичні акустичні сенсори, засновані на інтерферометрі Фабрі-Перо.**

У волоконно-оптичному акустичному сенсорі, заснованому на інтерферометрі Фабрі-Перо (рис. 8), світловий сигнал багато раз проходить через резонатор, відбиваючись від його напівпрозорих дзеркал. Вихідна потужність світлового сигналу такого інтерферометра буде максимальною, коли все виходить пучки будуть у фазі, і буде швидко спадати навіть від невеликого фазового зміни. Таким чином, малі фазові зміни, що вносяться до порожнини, будуть приводити до великої зміни інтенсивності світла на виході інтерферометра [1].

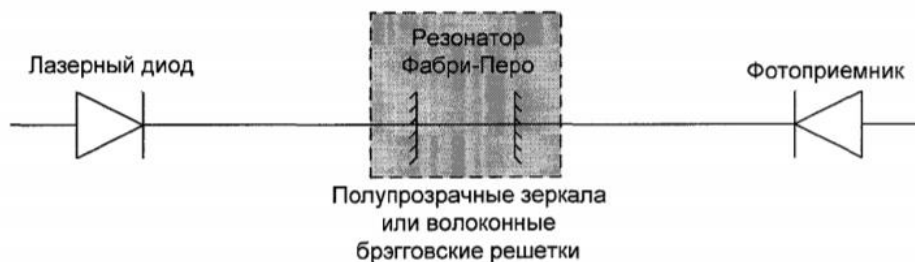


Рис. 8. Схема волоконного гідрофону, заснованого на інтерферометрі Фабрі-Перо.

Резонатор в волоконно-оптичному інтерферометрі Фабрі-Перо, може бути створений з двох торцевих поверхонь сколотого волокна або цільного волокна з парою бреггівських решіток.

Волоконно-оптичний акустичний сенсор, заснований на інтерферометрі Фабрі-Перо складається з вузькосмугового лазера діода, оптичного волокна з двома слабо відображають бреггівськими ґратами, оптичного циркулятора і фото детектора [17]. При цьому вихідний сигнал резонатора змінюється в залежності від того знаходиться він в фазі з оптичним сигналом або в протифазі (рис. 9).

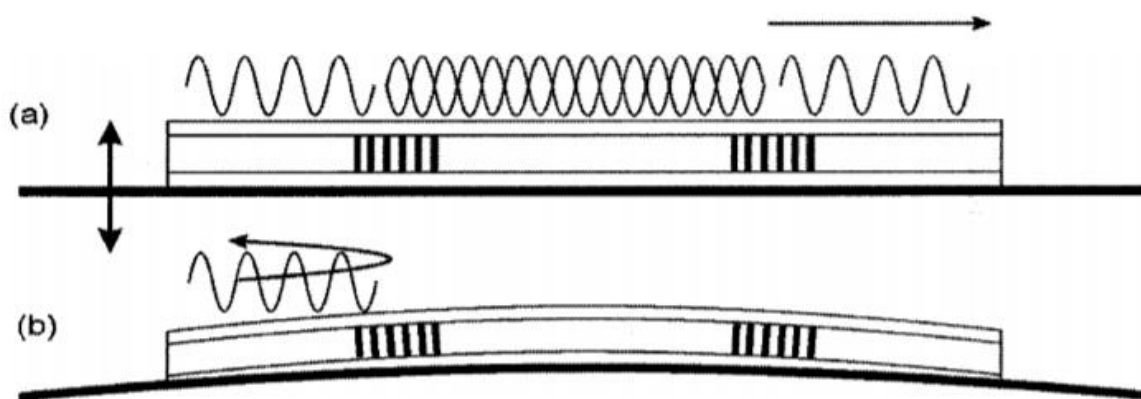


Рис.9. Резонатор Фабрі-Перо з двома слабовідбиваючими бреггівськими ґратами: (а) У фазі з проходять світлом (б) протифазі.

Акустичні датчики, засновані на інтерферометрах Фабрі-Перо, зазвичай дуже компактні. Як правило, такі датчики використовується в якості точкових пристроїв реєстрації акустичного сигналу [17].

## Розділ 1.2. Волоконні бреггівські решітки

### 1.2.1. Основні властивості волоконних бреггівських решіток

Волоконна бреггівськими решітка (ВБР) являє собою ділянку оптичного волокна, в серцевині якого показник заломлення періодично змінюється в поздовжньому напрямку (рис. 10) [21].

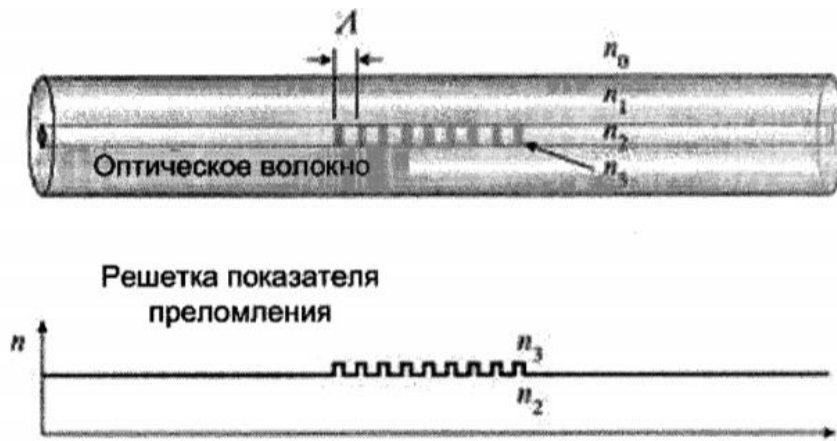


Рис. 10. Волоконна бреггівська решітка

Відомо, що випромінювання, що поширюється через оптичне волокно, являє собою комбінацію власних мод світловоду: направляються і випромінювальних. Випромінювальні моди оптичного волокна формують безперервну функцію, а направляються відповідають дискретного набору постійних поширення  $\beta_j$ . При відсутності змін в показнику заломлення, моди поширюються без взаємодії один з одним. Тому період модуляції показника заломлення (ПЗ) вибирається таким чином, щоб забезпечити необхідну резонансну взаємодію між обраними модами світловода. Ця модуляція показника заломлення пов'язує основну моду оптичного волокна з модою, що розповсюджується в зворотному напрямку. В результаті, на дискретній довжині хвилі поширюється через оптичне волокно відбивається від волоконної бреггівськими решітки.

Коефіцієнт відбивання залежить від глибини модуляції показника заломлення, а центральна довжина хвилі відбивання визначається умовою Брегга [19]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda,$$

де  $\lambda_B$  - довжина хвилі відбитого від решітки випромінювання,  $n_{eff}$  - ефективний показник заломлення серцевини волокна для центральної довжини хвилі,  $\Lambda$  - період бреггівськими решітки.

Світло, що поширюється в серцевині оптичного волокна, розсіюється кожною гранню решітки показника заломлення. якщо умови Бреґґа не виконуються, то відбитий від кожної грані решітки світло не потрапляє в фазу, в кінці кінців, загасає. Для довжин хвиль, які задовольняють умові Бреґґа, вклади відбитого світла від кожної грані решітки показника заломлення складаються і поширюються по волокну в зворотному напрямку [18].

Форма спектра решітки Бреґґа в серцевині одномодового оптичного волокна із середнім показником заломлення  $n_0$ . Форма відбиває контуру може бути виражена як [43]:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right)$$

де  $\Delta n$ - модуляція показника заломлення бреґґівськими решітки,  $x$  - період бреґґівськими решітки. За допомогою теорії пов'язаних мод висловимо функцію спектра відбиття решітки Бреґґа:

$$R(\lambda, l) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)}$$

де  $R(L, \lambda)$  - відбивання решітки як функція від довжини хвилі  $\lambda$  і довжини  $l$ ,  $\Omega$  - коефіцієнт зв'язку,  $\Delta k = k - \pi/\lambda$  - хвильової вектор розладу, де  $k = 2\pi n_0/\lambda$  - це постійна поширення і  $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$ . Коефіцієнт зв'язку для синусоїдальної функції модуляції показника заломлення виражається:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta(V)}{\lambda}$$

де  $\eta(V)$  - функція, яка визначає відсоток інтенсивності основної моди в серцевині волокна.

Для бреґґівськими довжини хвилі  $\Delta k = 0$ , тому вираз (4) набуває вигляду:

$$R(\lambda, l) = \tanh^2(\Omega l).$$

Розрахований спектр відбивання решітки як функції довжини хвилі показаний на малюнку 11;

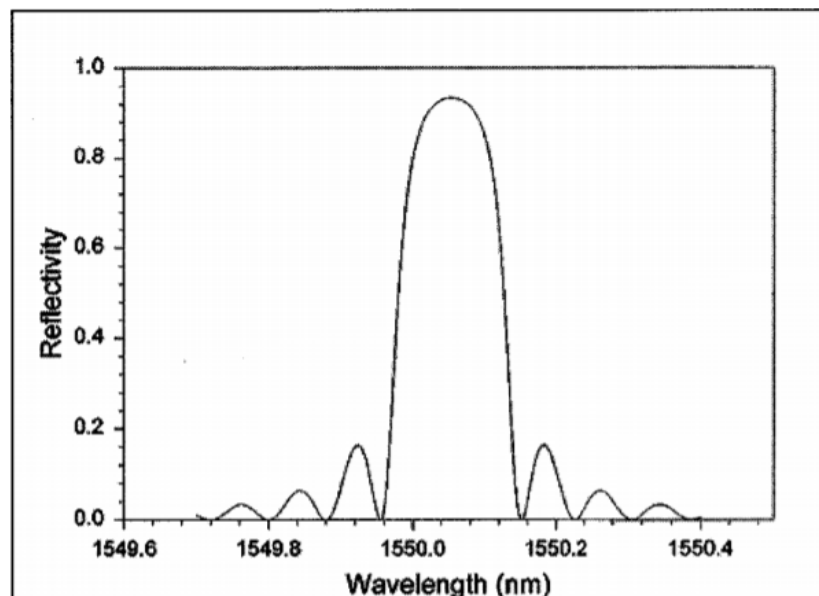


Рис. 11. Розрахований спектр відбивання ВБР

Коефіцієнт відбивання волоконної бреггівської решітки тим більше, чим більше глибина модуляції показника заломлення всередині волоконної бреггівської решітки. З виразу (3) видно, що резонансна довжина хвилі волоконної бреггівськими решітки залежить від ефективного показника заломлення серцевини світловоду і періоду модуляції показника заломлення. У свою чергу ці два параметри залежать від зовнішніх деформуючих напруг і температури. Використовуючи вираз (2) зміщення центральної довжини хвилі відбивання під дією деформації і температури можна записати так [41]:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n}{\partial l} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T. \quad (6)$$

Перший доданок у виразі (6) показує вплив деформації на волокно. Фізичний сенс його в зміні періоду решітки та показника заломлення, викликаного упругооптичним ефектом. Цей ефект можна описати таким виразом:



$$\Delta\lambda_B = \lambda_{B0}(1 - p_e)\varepsilon(z)$$

де  $p_e$  - ефективна пружнооптична стала, визначається як:

$$p_e = \frac{n^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$$

де  $p_{11}$  і  $p_{12}$  - компоненти пружнооптичного тензора,  $n$  - показник заломлення серцевини, а  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона. Для стандартного одномодового оптичного волокна з параметрами  $p_{11} = 0.113$ ,  $p_{12} = 0.252$ ,  $\nu = 0.16$  і  $n = 1.482$  при довжині хвилі відбивання ВБР  $\lambda_{B0} \sim 1550$  нм розрахункова чутливість до деформації становить 1.2 нм при відносному подовженні  $\varepsilon(z) = 10^{-6}$ . Експериментальні результати дослідження зсуву брегівської довжини хвилі відбиття від деформації представлені на малюнку 12 [20,41].

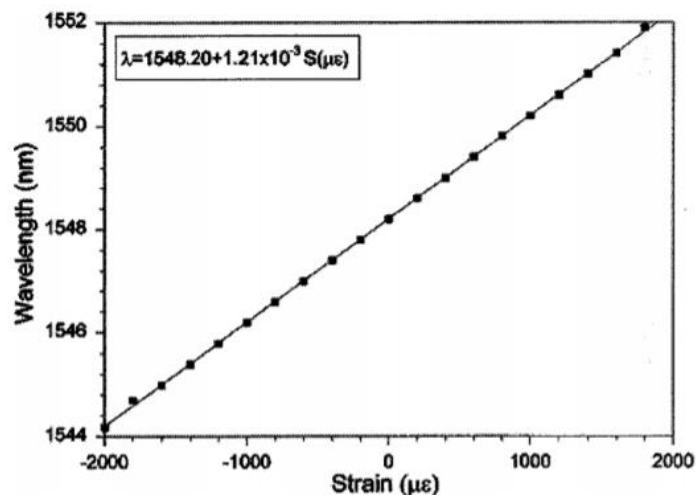


Рис. 12. Залежність зміщення брегівської довжини хвилі від прикладеної деформації

Другий доданок в (6) показує температурний вплив на брегівську решітку. Зсув брегівської довжини хвилі відбувається через температурне розширення кварцу, що викликає зміна періоду решітки, а також зміни показника заломлення волокна. Подібне зміщення  $\lambda_B$  при зміні температури  $\Delta T$  може бути записано як:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T$$

де:

$$\alpha = (1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$$

- коефіцієнт термічного розширення (для кварцу  $\alpha = 0.55 \cdot 10^{-6}$ ),

$$\xi = (1/n)(\partial n/\partial T)$$

- термооптичний коефіцієнт (для волокон з добавками германію приблизно рівний  $8.6 \cdot 10^{-6}$ ). Видно, що зміна показника заломлення є домінуючим ефектом. З рівняння (9) можна розрахувати, що температурний зсув решітки Брегга в одномодовому оптичному волокні становить  $\sim 13.7$  нм / °С. На малюнку 20 показана температурна залежність резонансної довжини хвилі волоконної бреггівської решітки [20,41].

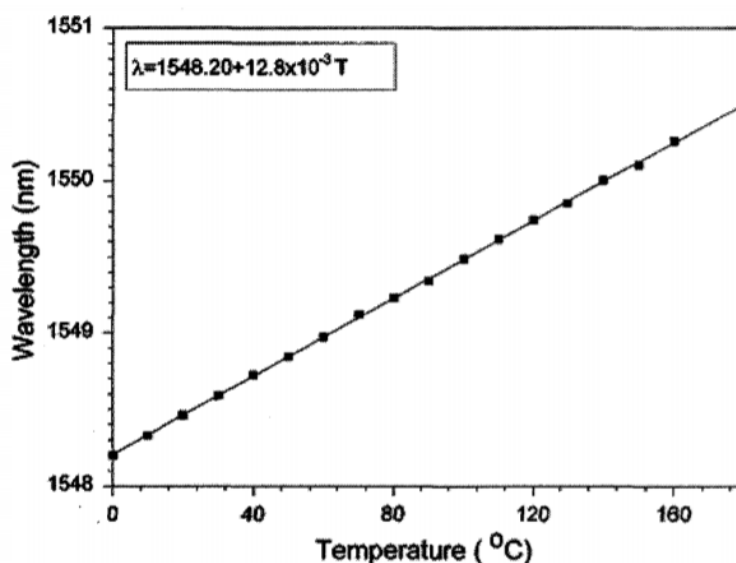


Рис. 13. Залежність резонансу ВБР від температури

### 1.2.2. Фоточутливість оптичного волокна

Зміна показника заломлення областей світловода, підданих опроміненню, був названий фоточутливістю. На сьогоднішній день запропоновано кілька основних механізмів фоточутливості оптичних

волокон, зроблених на основі германо-силікатних стекол [21,23]. Фоточувствительність таких світловодів обумовлена наявністю в структурі скла неоднорідностей, утворення яких безпосередньо пов'язане з ходом процесу формування заготовки і витяжки волоконного світловода [24, 25, 26, A10]. Ці неоднорідності визначають спектр поглинання германо-силікатного скла, представлений на рисунку 14 для УФ діапазону [24].

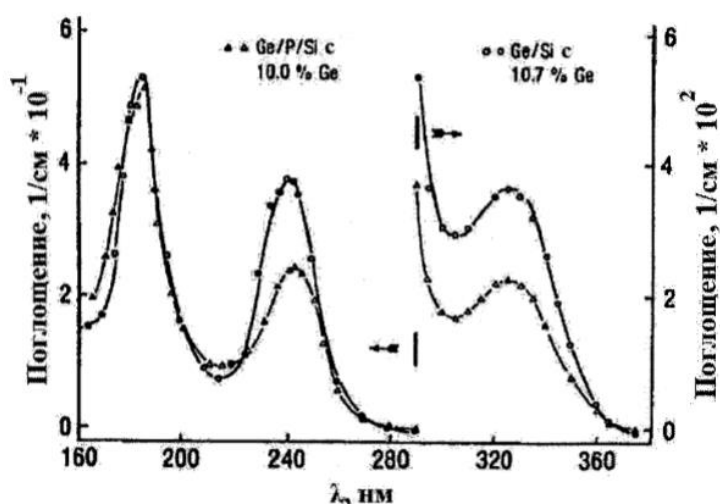


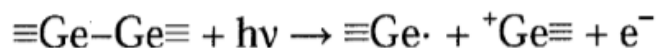
Рис. 14. Спектр поглинання германо-силікатного скла в УФ діапазоні

З графіка на рисунку 14 видно, що поглинання германо-силікатних стекол має три максимуми в УФ діапазоні спектру, розташованих поблизу 185, 242, 325 нм. [24,49,50,51,52,53].

Таким чином, при поглинанні оптичного випромінювання структурні неоднорідності утворюють дефекти германо-силікатного скла, що формують решітку Брегга в ОВ. Германієвого киснево-дефіцитний центр (ГКДЦ) - основний тип неоднорідності германо-силікатного скла, що відповідає за ефект фоточутливості [20, A10]. У його структурі відсутній атом кисню, і такий зв'язок може бути розірвана при поглинанні кванта енергії в 5 еВ, що відповідає довжині хвилі оптичного випромінювання 242 нм, з утворенням дефекту, так званого Е центру, який являє собою атом кремнію або германію,

з'єднаний з трьома атомами кисню і одним неспареним електроном, званий висить зв'язком [48].

Нижче наведена реакція освіти Ge E центру (= Ge-) з ГКДЦ (= Ge-Ge =) під дією УФ випромінювання [27]:



Як видно з реакції (10) фотоіонізація ГКДЦ (Ge-Ge або Ge-Si зв'язку) створює позитивно заряджені центри і вільні електрони.

Вільні електрони дифундують з області з більшою інтенсивністю в область з меншою інтенсивністю інтерференційної картини (рис. 15).

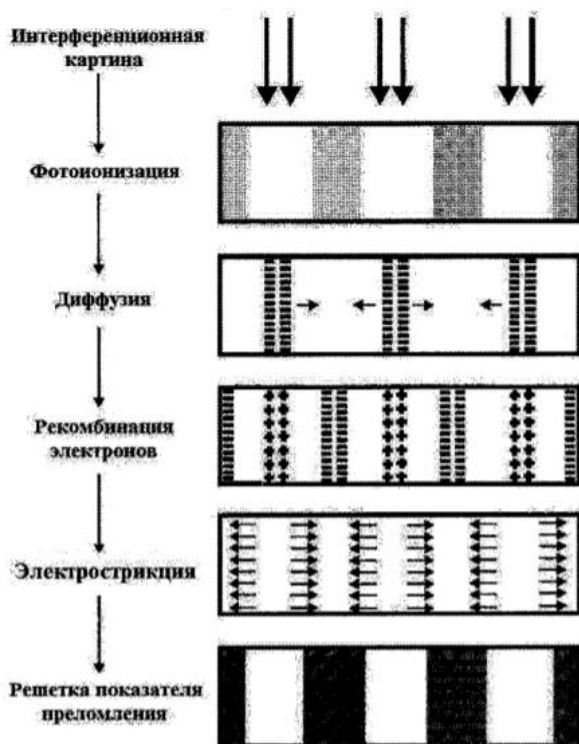


Рис. 15. Електрострикційна модель формування решітки ПЗ

Для утворення стабільної решітки зарядів необхідні стабільні пастки електронів. Ними є відомі парамагнітні центри Ge (I), що утворюються в результаті захоплення електронів на чотирьохкоординуваних атомах германію. В процесі рекомбінації частина вільних електронів не повертається

на вихідні донори. Після релаксації збудження в максимумі інтерференційної смуги утворюється надлишковий позитивний заряд. Надлишковий негативний заряд створює симетричні максимуми на периферії кожної інтерференційної смуги. В решітці зарядів виникає електричне поле  $E$ , періодично змінюється уздовж осі світловода.

В результаті електрострикції максимальне стиснення серцевини ОВ буде в області максимального  $E$ , тоді як в області  $E = 0$  за законами пружності буде розтягуватися. Таким чином, решітка зарядів створює пружну періодичну деформацію обсягу серцевини ОВ, модуляцію її щільності і показника заломлення [28].

При записи бреггівських решіток в стандартному телекомунікаційному волокні 8MP-28, виникає проблема, пов'язана з тим, що таке волокно з молярною концентрацією германію 3% - 5% має слабку фоточутливість і низький поріг насичення, недостатній для ефективної записи решіток показника заломлення [29]. У літературі запропоновано ряд методів збільшення фоторефрактивному германо-силікатних световодних волокон. Основний метод збільшення фоторефрактивному германо-силікатних світловодів полягає в підвищенні концентрації діоксиду германію в серцевині [25,39]. Інші методи полягають в легуванні заготовок для витяжки оптичного волокна такими хімічними елементами, як бор, олово, азот, фосфор, сурма спільно з германієм, що призводить до збільшення фоторефрактивності світловодів [22]. Виготовлені вище зазначеними способами волоконні світловоди мають матеріальні і хвильові характеристики, відмінні від стандартних, що призводить до додаткових втрат на стиковку і збільшення лінійного загасання оптичного сигналу.

У зв'язку з зазначеними недоліками, представляє інтерес збільшення фоточутливості світловодів без значної зміни його хвильових характеристик. Наприклад, спосіб насичення скла воднем в полум'я пальника, здатне на порядок збільшити наведений показник заломлення стандартних світловодів [29]. Разом з тим це веде до зростання концентрації ОН груп в структурі кварцового скла, що володіють смугами поглинання в області 1.4 мкм, що вносять додаткові оптичні втрати і призводять до зменшення механічної міцності світловода.

Інший спосіб полягає в насиченні скла молекулярним воднем при низьких температурах і високому тиску. В такому випадку водень знаходиться в склі в фізично розчиненому стані. Световод, підданий такій обробці, має підвищену фоточутливість до тих пір, поки водень знаходиться в структурі скла. В ході зворотної дифузії водню в навколишнє середовище фоточутливість зменшується, повертаючись до свого початкового значення, тому світловод, підданий водневій обробці, слід зберігати при низькій температурі [22].

#### **1.2.4. Основні методи запису волоконних бреггівських решіток**

Запис бреггівських решіток являє собою досить складну задачу. В силу малого періоду ВБР (Л-0.5 мкм) їх, як правило, формують з використанням інтерференційних методів. Так як процес запису необхідної решіткової структури може тривати кілька десятків хвилин, виготовлення якісної решітки можливо лише при високій стабільності інтерференційної картини [22]. Незважаючи на те, що число запропонованих схем записи ВБР досить велике [23,30], можна виділити ряд основних принципів їх організації, а саме: інтерферометричний метод, через фазову маску і покроковий метод.

У разі інтерферометричної методу використовується об'ємний інтерферометр, який ділив падаюче УФ - випромінювання на два пучка, які, сходяться один з одним, утворюють картину інтерференції на оптичному волокні.

Для запису використовується інтерферометри як з амплітудним розподілом падаючого випромінювання, так і з просторовим [20].

### *1) Інтерферометри з амплітудним розподілом*

У цих інтерферометрах відбувається поділ вихідного УФ пучка за допомогою світлороздільної пластини на два однакових променя, які потім зводилися в область розташування опромінюваного світловода під певним кутом один до одного і інтерферували (рис. 23). Картина інтерференції утворює в серцевині волокна періодичну структуру показника заломлення. Кут сходження променів задає період інтерференційної картини і, отже, період ВБР. У такому період решітки буде визначатися наступним виразом:

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2\sin\frac{\theta}{2}},$$

де -  $\lambda_w$  довжина хвилі УФ випромінювання,  $\theta$  - кут між пучками.

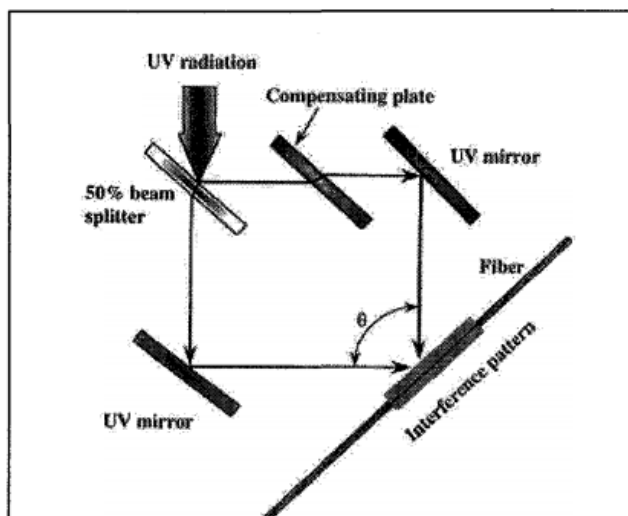


Рис. 16. Запис ВБР в інтерферометрі з амплітудним розподілом вихідного пучка

З урахуванням цього можна записати вираз для бреггівської довжини хвилі решітки, записаної в такому інтерферометрі:

$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \lambda_w}{\sin \frac{\theta}{2}}$$

Як видно з цього виразу, резонансну довжину хвилі можна перебудовувати, змінюючи довжину хвилі записуючого випромінювання  $\lambda_w$  і / або кут зведення променів  $\theta$ . Вибір довжин хвиль обмежений фоточутливої областю волокна, в той час як вибір кутів в діапазоні від 0 до 180 ° не має обмежень.

Головним достоїнством інтерферометра з амплітудним розподілом пучка є можливість запису ВБР на будь-яку довжину хвилі [45, 46]. Це робиться простим регулюванням кута сходження УФ променів [42]. Також цей метод хороший тим, що дозволяє формувати решітки різної довжини.

Крім того, використовуючи криві відбивні поверхні дзеркал, можна записувати решітки зі спеціальною геометрією, наприклад, лінійно чірпірованніе.

Головний недолік такої схеми - це чутливість до механічних вібрацій. Мікронні зміщення дзеркал, дільника або вузлів установки призводять до спотворень картини інтерференції і зникнення решітки. Крім того через досить довгих вільних шляхів промені в інтерферометрі піддаються флуктуацій показниками заломлення повітря, що в підсумку позначається на картині інтерференції. До того ж до цих недоліків якісні решітки можуть бути записані лазерним джерелом, який має хорошу просторову і тимчасову когерентність з постійною вихідною потужністю.

## 2) Інтерферометри з просторовим розділенням пучка

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			31



Інтерферометри цього типу не так часто застосовуються при запису решіток, як інтерферометри з амплітудним розподілом. Однак вони мають деякі переваги в порівнянні з останніми. Серед таких інтерферометрів для запису ВБР найбільш часто використовуються призмений інтерферометр і інтерферометр Ллойда.

Схема призмений інтерферометра показана на малюнку 24. Призма зроблена з високооднородного УФ прозорого кварцу з хорошим пропусканням. У цій установці УФ пучок потрапляє на верхню грань призми, проходить всередину і за рахунок заломлення відхиляється. Минулий пучок просторово розділяється через повного внутрішнього відбиття однієї його частини від межі призми. Обидві поширюються частини потім сходяться на вихідній грані призми, утворюючи картину інтерференції.

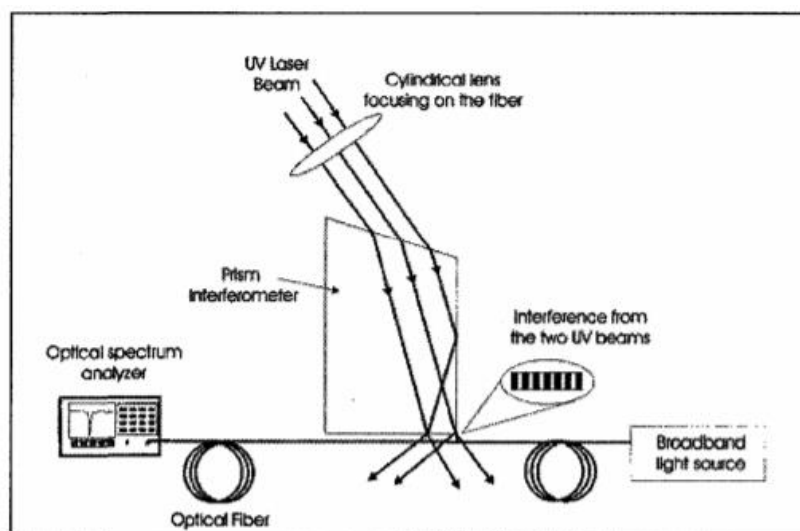


Рис. 17. Схема призмоподібного інтерферометру

Експериментальна установка по запису ВБР в інтерферометрі Ллойда показана на малюнку 18. Цей інтерферометр складається з діелектричного дзеркала, що направляє половину падаючого вихідного УФ випромінювання на волокно перпендикулярний дзеркала. Накладення двох час пучка один на одного створює інтерференційну картину перпендикулярну осі волокна. Як і

в попередній схемі, використання циліндричної лінзи дозволяє сфокусувати випромінювання в серцевину волокна.

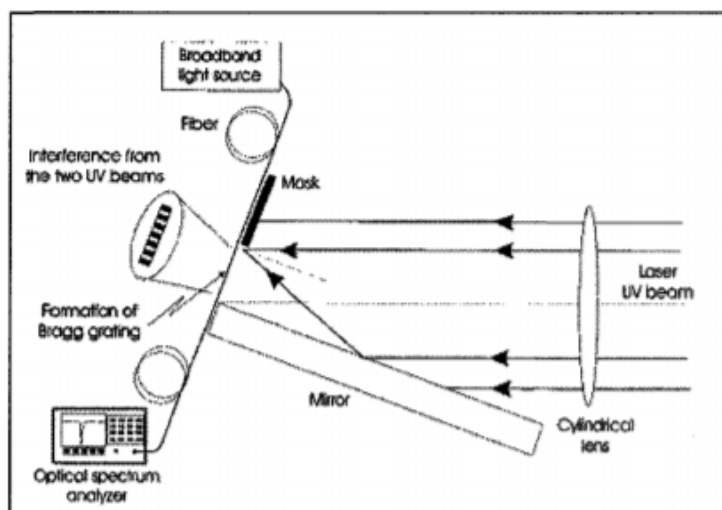


Рис. 18. Схема інтерферометра Ллойда

Головна перевага інтерферометрів з просторовим поділом пучка в тому, що використовується тільки один елемент. Це істотно знижує чутливість до механічних вібрацій.

Крім того невелике вільний простір, в якому поширюються промені, зменшує спотворення їх фронтів, що викликається повітряними потоками і температурної різницею. Більш того ця схема дозволяє легко перебудовувати кут між інтерферуючими променями, а значить і період ВБР, простим поворотом дзеркала або призми.

Один з недоліків такої системи в тому, що довжина записуваної решітки обмежена половиною ширини пучка. Інший недолік - обмежений діапазон перебудови довжин хвиль записуваної ВБР. Так як з ростом кута між пучками різниця ходу зростає, то довжина когерентності джерела є обмежувачем хвильової перебудови.

### 3) Вимоги до лазерних джерел

Джерела випромінювання, які використовуються для запису решіток з допомогою вищезначених інтерферометрів, повинні мати хорошу часову і просторову когерентності. Хороша просторова когерентність не так важлива в інтерферометрі з просторовим розділенням пучка в разі, якщо число відображень в кожному плечі однаково. Це особливо важливо при використанні джерела з поганою просторовою когерентністю, наприклад, ексімерного лазера. Тимчасова когерентність повинна бути, принаймні, дорівнює довжині решітки, щоб забезпечити максимальну видимість інтерференційної картини. Метод запису ВБР через фазову маску є одним з найбільш поширених. У ньому використовується дифракційну оптичний елемент - фазову маску - для просторової модуляції записуючого УФ випромінювання. Фазова маска (ФМ) може бути сформована голографічно або за допомогою електронно-променевої літографії. Голографічна маска не має зіпсованих штрихів, що є характерним для літографічного методу виготовлення ФМ. Однак складні профілі можуть бути реалізовані тільки літографією. ФМ має певну, задану структуру поверхні, виконану в високоякісному кварці, прозорому для УФ.

Профіль маски вибирається таким, що коли УФ пучок падає на неї, то нульовий порядок пригнічується до декількох відсотків від попередньої потужності, а +1 і -1 порядки максимізуються і по потужності складають до 35%. Саме ці порядки дифракції беруть участь в утворенні картини інтерференції. Період ВБР становить половину періоду маски. ФМ істотно спрощує схему запису ВБР. Простота через використання всього одного оптичного елемента забезпечує надійний і досить стабільний метод запису. Так як волокно поміщається безпосередньо за маскою в ближньому полі дифрагованих УФ променів, чутливість до вібрацій, і, отже, проблеми стабільності мінімальні. Погана тимчасова когерентність не впливає на можливість запису (рис. 19)

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			34

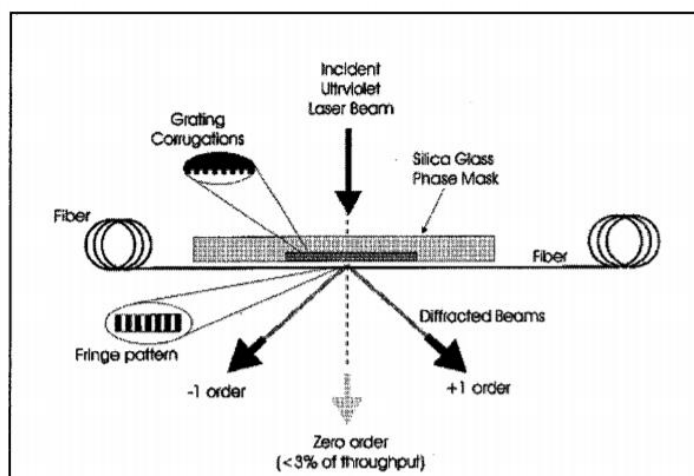


Рис. 19. Схема запису через фазову маску

KrF ексимерні лазери - найбільш часто використовувані джерела УФ для запису ВБР через ФМ [47]. Подібні джерела, як правило, мають низькі просторову і тимчасову когерентності. Погана просторова когерентність вимагає того, щоб волокно було поміщено поблизу маски для кращої модуляції показника заломлення. Чим далі волокно від ФМ, тим менше модуляція показника заломлення і коефіцієнт відбиття решітки. Очевидно, що віддаленість волокна від маски - головний параметр для запису якісних решіток. Однак приміщення волокна впритул до ФМ може привести до пошкодження останньої. Поліпшення просторової когерентності записуючого УФ випромінювання не тільки збільшить силу і якість решіток, але також знизить вимоги до положення волокна щодо маски. Щоб зрозуміти важливість просторової когерентності при записі ВБР розглянемо просту схему, яка показує хід променів після ФМ (рис. 20).

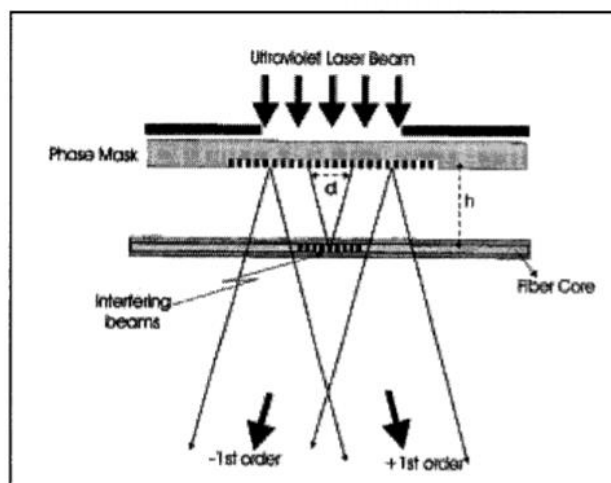


Рис. 20. Схема ходу променів при запису ВБР через ФМ

Припустимо, що серцевина волокна знаходиться на відстані  $h$  від фазової маски. Минулі  $+1$  і  $-1$  порядки дифракції, які беруть участь в інтерференції, виходять з різних точок маски, відстань між якими дорівнює  $d$ . Так як відстань від ФМ до волокна одно подвоєною ширині пучка, то тимчасова когерентність не так важлива для гарної видності картини інтерференції. з іншого боку, зі зростанням величини  $h$ , відстань  $z_1$  також збільшується. у цьому випадку просторова когерентність дуже важлива для формування гарного контрасту інтерференційної картини. Відсутність необхідності розташовувати волокно в безпосередній близькості від маски дозволяє формувати решітки з похилими штрихами, розміщуючи волокно під кутом до ФМ [40].

У разі використання покрокового методу записи ВБР кожен штрих решітки формується окремо за допомогою сфокусованого імпульсу від ексімерного лазера. Одиночний імпульс проходить через маску, в якій є вузька щілина. Лінза, що знаходиться за маскою, проектує зображення щілини в серцевину волокна і показник заломлення в опромінених частини волокна підвищується (рис. 21). Після цього волокно переміщається уздовж своєї осі на величину рівну періоду  $L$  і процес повторюється для формування ґратчастої структури.

Необхідною умовою для покрокової техніки є стабільність і мікронна точність системи переміщення волокна.

Головна перевага покрокового методу полягає в можливості змінювати параметри ВБР. В силу того, що решітчаста структура формується точково можна одночасно варіювати довжину решітки, види штрихів і спектральну характеристику. Решітки можуть бути точно записані простою зміною величини переміщення волокна після кожного опромінення.

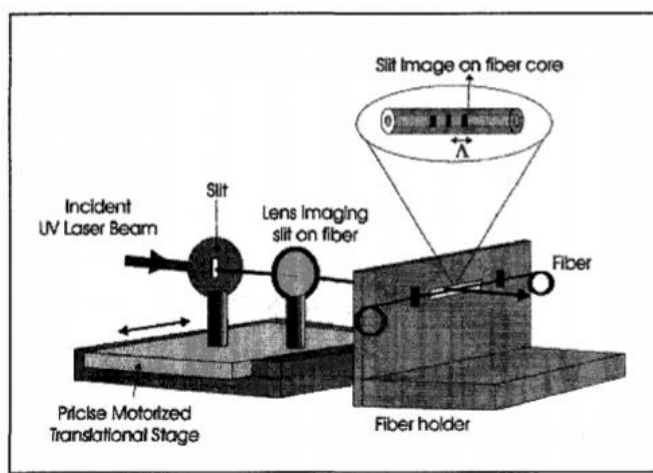


Рис. 21 Установка для покрокового методу запису

Основний недолік цього методу - тривалий процес формування ВБР. Тому можливі помилки в періоді решітки через температурних градієнтів і / або невеликих варіацій напружень в волокні. Це накладає обмеження на довжину ВБР. Для отримання відбивання в першому порядку на довжині хвилі 1550 нм період повинен становити близько 530 нм. Через мікронних переміщень волокна і точної фокусування решітки першого порядку в області 1550 нм з допомогу покрокового методу записати решітки ще не вдалося. Поки вдалося записати тільки ВБР, що відображають в другому і третьому порядках, з періодом близько 1 і 1.5 мкм відповідно [54].

### 1.3 Висновки

Аналіз показав, що інтерферометричний метод реєстрації акустичного тиску може бути визнаний найбільш перспективним для застосування в волоконно-оптичних акустичних датчиках. При цьому існуючі шляхи створення масивів волоконно-оптичних акустичних сенсорів і розподілених ліній на їх основі, на основі традиційних фазових інтерференційних датчиків, вимагає установки в чутливу частину розподіленої лінії великої кількості додаткових елементів: волоконно-оптичних розгалужувачів, волоконних підсилювачів, та ін. Тому необхідно проведення додаткового пошуку шляхів створення розподілених сенсорних ліній на основі фазових інтерферометричних датчиків.

У розділі описані властивості решіток Брегга і методи їх створення, так як вони є найбільш сучасним методом мультиплексування сигналу.

У даній роботі досліджується концепція побудови розподіленої лінії волоконно-оптичних акустичних сенсорів на основі фазових інтерферометричних датчиків на бреггівських решітках. Для побудови такої сенсорної лінії необхідна реалізація технологічного процесу запису масивів бреггівських решіток в двошпроменевозаломлююче волокно.

## РОЗДІЛ II. КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА НА ОСНОВІ БРЕГГІВСЬКИХ РЕШІТОК

### 2.1. Принцип дії волоконно-оптичного сенсора на бреггівських решітках

На основі аналізу літературних даних був запропонований принцип дії розподіленої лінії волоконно-оптичних акустичних сенсорів, що складається з фазових інтерферометричних датчиків (ФІД) на бреггівських решітках. В найпростішому випадку (одного ФІД) він ілюстрований схемою на рисунку 22. Кожна з решіток Брегга (ВБР1 і ВБР2) датчика відображає імпульс, що надходить на неї від імпульсного лазера, на одній довжині хвилі, що задовольняє умову Брегга. При цьому тимчасова затримка між відбитими імпульсами дорівнює подвоєному часу поширення світла в чутливому елементі датчика - волокні, укладеному між решітками [60,61].

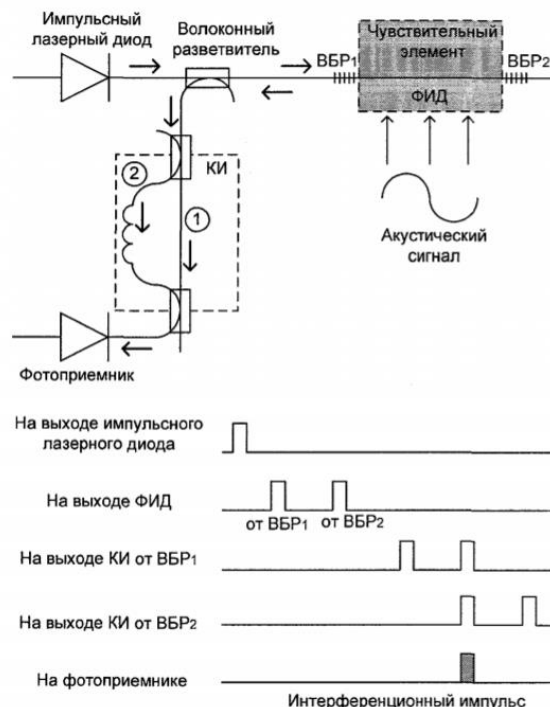


Рис. 22. Принцип дії фазових інтерферометричних датчиків на бреггівських решітках



Відбиті імпульси надходять в компенсуючий інтерферометр (КІ), який, в свою чергу, також роздвоює кожен з них. Затримка, що вноситься в поширення імпульсів плечем 2 КІ по відношенню до плеча 1, забезпечує перекриття в часі імпульсу, відбитого від ВБР1 на виході плеча 2 і імпульсу, відбитого від решітки ВБР2, на виході плеча 1 і зсув їх по фазі на  $\varphi_0 = \pi/2$ . Зміна в часі деформації чутливого елемента датчика в результаті зовнішнього впливу викликають зміну різниці фаз інтерферуючих імпульсів. Останнє перетворюється фотоприймачем (ФМ) в зміну величини фотоструму. Додатковий зсув фаз  $\varphi_0 = \pi/2$  між інтерферуючими імпульсами забезпечує роботу фотодетектора на ділянці максимальної крутості, а рівність інтенсивностей інтерферуючих імпульсів дозволяє отримати максимальну амплітуду сигналу на виході фотоприймача.

Використання волоконних бреггівських решіток для формування ФІД, дозволяє об'єднувати в одному кабелі велику кількість сенсорів, відмінності сигнали від окремих гідрофонів по довжині хвилі (рис. 23) [60] і тимчасової затримки (рис.24) [61].

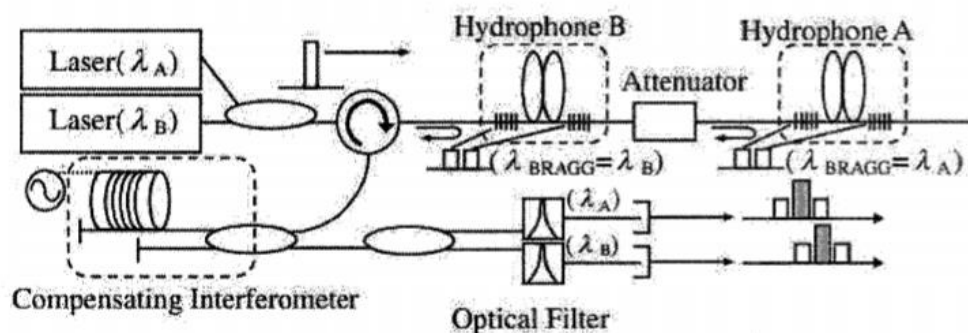


Рис. 23 Мультиплексування фазових інтерферометричних датчиків на бреггівських решітках по довжині

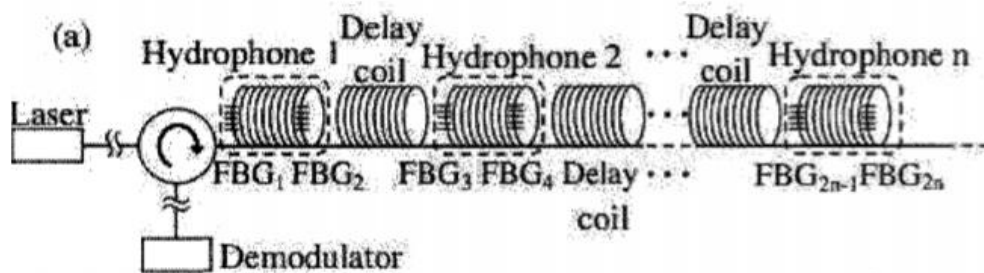


Рис. 24 Мультиплексування фазових інтерферометричних датчиків на бреггівських решітках по часу

Використання решіток Брега в поєднанні з потужним широкосмуговим джерелом імпульсного випромінювання (ШДІВ) дозволяє об'єднати в одному оптичному волокні досить велику кількість ФІД на бреггівських решітках. Побудова розподіленої сенсорної лінії з 384 ФІД, об'єднаних в тимчасові групи ( $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_{32}$ ), кожна з яких складається з 12 ФІД, мультиплексованих по довжині хвилі бреггівськими відбиваннями ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{12}$ ) показано на малюнку 25.

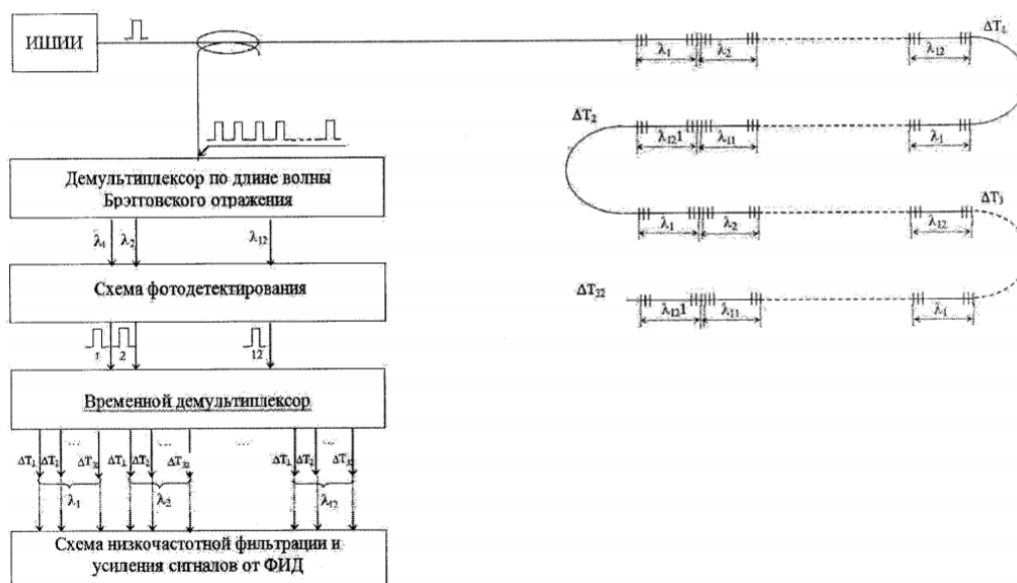


Рис.25 Побудова лінійної антенної решітки з 384 ФІД, об'єднаних в тимчасові групи( $\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_{32}$ )

Така кількість датчиків відповідає кількості приймачів тиску в складі

перспективної гідроакустичної решітки. Поділ сигналів від датчиків решітки відбувається демультиплексором по довжині хвилі Бреґівського відбивання і тимчасовим демультиплексором. Схема фотодетектування включає в себе 12 каналів - за кількістю довжин хвиль Бреґівського відбивання. Кожен з 12 каналів схеми містить компенсуючий інтерферометр і фотоприймач, що працюють з усіма 32-ма ФІД антеною решітки, що мають однакову довжину хвилі бреґівського відбивання, яка відповідає цьому каналу.

## 2.2. Розрахунок і побудова моделі інтерферометра Тальбота для запису волоконних бреґівських решіток

При записи волоконних бреґівських решіток через бічну поверхню оптичного волокна, зазвичай застосовують метод фазової маски. Недоліком цього методу є неможливість швидкої зміна періоду ВБР без заміни фазової маски. Тому часто для формування решіток Бреґа використовують інтерферометри з просторовим розділенням пучка [70]. Співвідношення для періоду решітки показника заломлення наведеної в оптичному волокні має наступний вигляд:

$$\Lambda_{BG} = \frac{\lambda_{Bragg}}{2n_{eff}}$$

де  $n_{eff}$  — ефективний показник заломлення волокна,  $\lambda_{Bragg}$  — резонансна довжина хвилі Бреґа.

Знаючи довжину хвилі лазера, за допомогою якого проводиться запис, і період фазової маски можна розрахувати кут розчину для  $\pm 1$  порядку дифракції:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda_{laser}}{\Lambda_{pm}},$$

де  $\Lambda_{pm}$  — період фазової маски,  $\lambda_{laser}$  — довжина хвилі лазера, яким виробляється індукування решітки Брегга.

Кут падіння променів на волокно виражається співвідношенням:

$$\sin \theta = \frac{n_{eff} \lambda_{laser}}{\lambda_{Bragg}}$$

Кут падіння променів на волокно ( $\theta$ ) і кут повороту дзеркал ( $\varphi$ ) пов'язані таким співвідношенням:

$$\theta = \alpha + 2\varphi$$

Зміна кута повороту дзеркал веде до зміни інтерференційної картини, а значить і до зміни періоду решітки. в спеціальному програмному додатку (рис.26) був використаний наведений вище математичний апарат. Знаючи відстань між дзеркалами, довжину хвилі випромінювання, а також один з параметрів - ефективний показник заломлення, довжину хвилі Брегга, і кут повороту дзеркал можна розрахувати геометрію інтерферометра і значення шуканих величин.

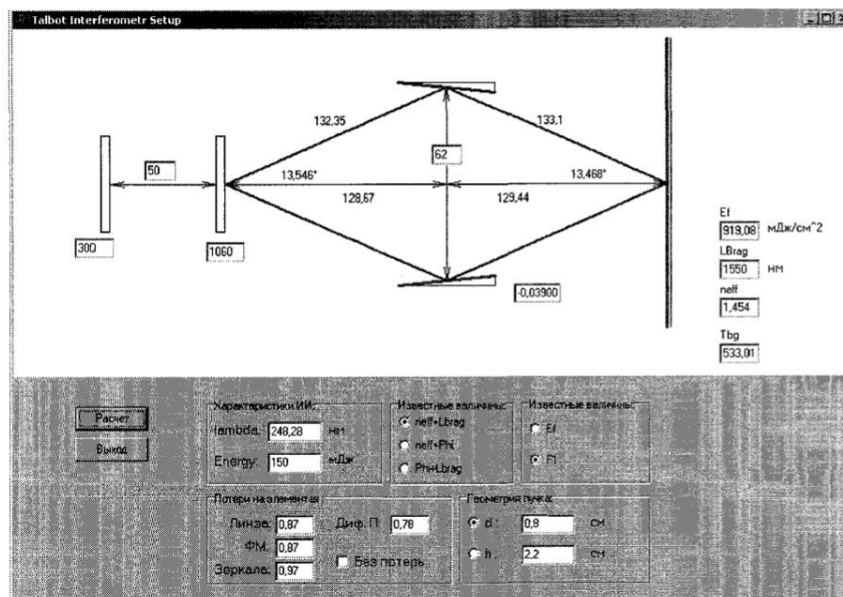


Рис. 26. Програмний додаток моделює геометричні та енергетичні параметри інтерферометричної схеми запису ВБР

Розрахунок енергетичних характеристик установки проводиться таким чином. Знаючи фокусну відстань лінзи ( $f$ ), потужність випромінювання лазера ( $P_{laser}$ ), а також вибравши вісь апроксимації можна розрахувати потужність випромінювання ( $P$ ) на відстані  $L$  від лінзи (для  $L < f$ ):

$$P = P_{laser} \frac{2r}{2(f-L) \tan(r/f)}$$

де  $r$  - параметр визначає геометрію пучка по короткій або довгій осі лазерного пучка.

На рисунку 27 представлена модель інтерферометра Тальбота. Закріплені в кінематичних пазах діелектричні дзеркала (1) встановлені на поворотні платформи (2), останні забезпечують високу точність періоду решітки у волокні ( $< 1,3$  нм).

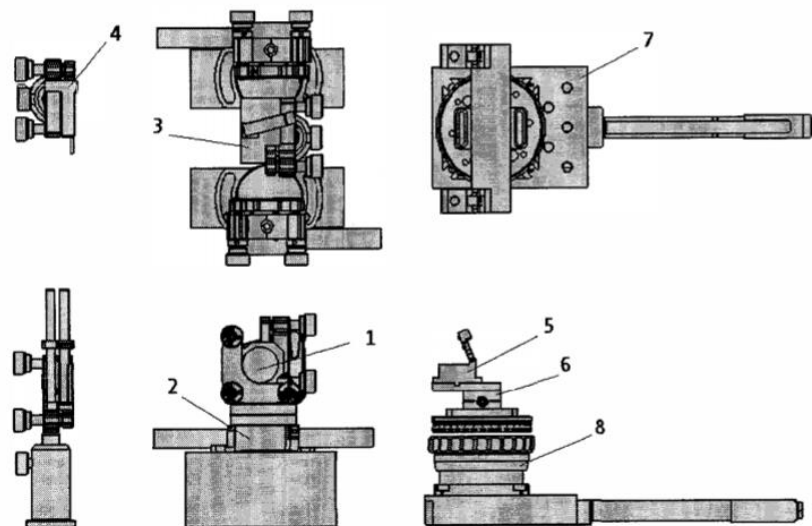


Рис. 27. Параметрическая модель интерферометра Тальбота

Між дзеркалами встановлений тримач для делительного куба (3), за допомогою якого відбувається настройка паралельності дзеркал - світло у видимому діапазоні спектра потрапляє на ділильний куб і відбивається на дзеркало, шляхом підстроювання кінематичної зрушення кожне дзеркало встановлюється паралельно грані куба. Після юстування на місце власника з кубом ставиться екран, для погашення нульового порядку дифракції. Фазова маска, закріплена в утримувач (4), кріпиться на фіксованій відстані від центру дзеркал. Волокно, затиснуте в фіксатори (5), встановлюється через перехідну плиту на з'єднаний з вертикальною зрушення гоніометр (6), для більшої маневреності дана частина схеми жорстко закріплена на лінійній зрушення (7). Гоніометр забезпечує зміна положення кута нахилу волокна щодо інтерференційної картини, що дозволяє записувати решітки під кутом до осі поширення випромінювання в світловод. У свою чергу вертикальна переміщення (8) забезпечує мобільність при виборі кута повороту волокна. Макетний стіл, на якому встановлений інтерферометр, кріпиться на ізоляційну плиту, що дозволяє погасити вібраційні шуми компонентів і навколишнього середовища.

При моделюванні установки слід враховувати спотворення вносяться

вібраційними шумами від компонентів і навколишнього середовища, з цією метою як правило використовують спеціальні вібро-ізоляційні макетні столи, а частина установки містить інтерферометр який накривають захисним ковпаком (рис. 28). Особливо це актуально для запису ВБР при багатоімпульсній експозиції.

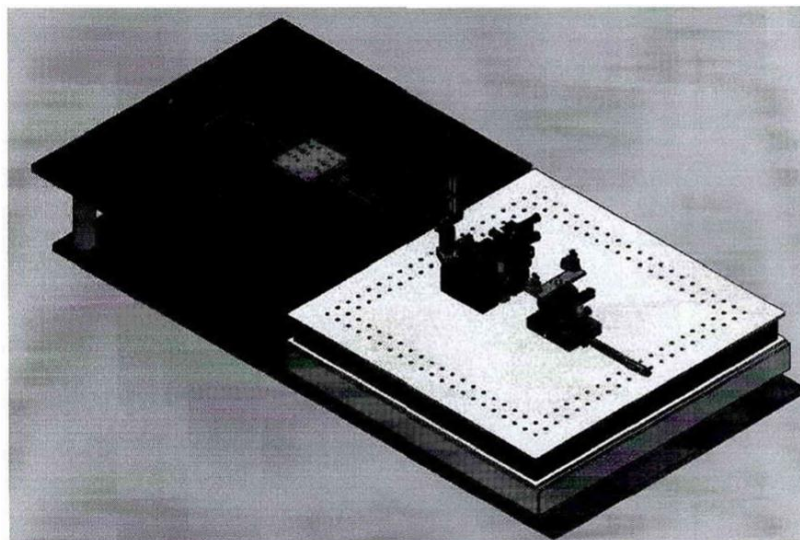


Рис. 28. Оптичний стіл з інтерферометром для запису ВБР

Змодельована інтерферометрична схема запису решіток Брега дозволить виготовляти як сильно-відбивні поодинокі ВБР, так і масиви волоконних брегівських решіток, безпосередньо в процесі витяжки оптичного волокна.

## 2.3 Висновки

Показано, що розглянутий принцип дії фазових інтерферометричних датчиків на волоконних брегговських решітках, перспективний для створення розподіленої акустичної сенсорної лінії.

Технологія запису масивів брегговських решіток для розподіленої сенсорної лінії на основі фазових інтерферометричних датчиків, вимагає створення схеми запису з можливістю швидкого перестроювання періоду

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			46

решіток Брегга. Тому в ході роботи був змодельовано інтерферометр  
Тальбота з просторовим розділенням пучка для запису волоконних  
бреггівських решіток.

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			47



## РОЗДІЛ III. ЗАПИС РЕШІТКИ БРЕГГА В КРИСТАЛЛ $\text{LiNbO}_3$

### 3.1. Опис схеми запису решітки Брегга в кристал $\text{LiNbO}_3$

Стикування з оптичним волокном монокристал  $\text{LiNbO}_3$  каналним волноводом виглядає, як показано на малюнку.

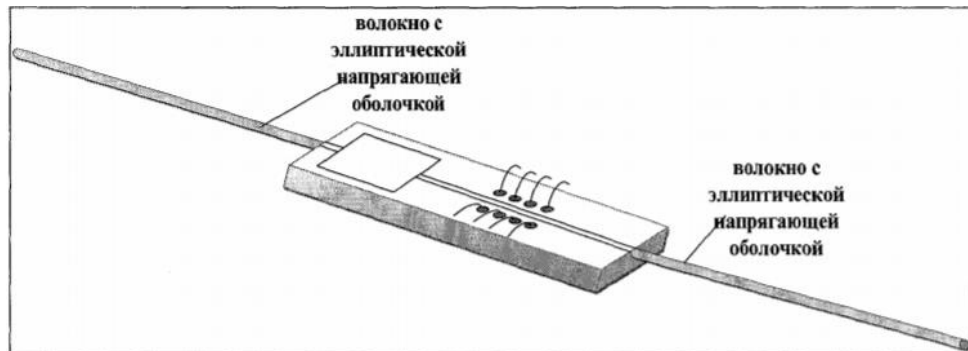


Рис. 29 Зразок для запису бреггівської решітки

Для забезпечення електричного управління по обидва боки хвилеводу напилена система мідних електродів. Відстань  $d$  між електродами склала 20 мкм. З урахуванням конфігурації електродів у вигляді тонких компланарних плівок при різниці потенціалів між ними  $U$  електричне поле у хвилеводі  $E \sim 2\pi Ud$ . Для збільшення напруги пробою, а також для захисту від пилу і вологи, область хвилеводу покрита шаром окису кремнію. Така конструкція дає можливість створення досить однорідного в області хвилеводу поперечного по відношенню до його осі електричного поля напруженістю до 80 кВ / см при напрузі на електродах до 250 В [72]

Хвилеводна решітка сформована методом голографічного запису за допомогою YAG: Nd-лазера на довжині хвилі 532 нм (рис.30). Для підвищення чутливості підкладки до записуючого випромінення в приповерхневих шар була додатково проведена дифузія іонів міді.

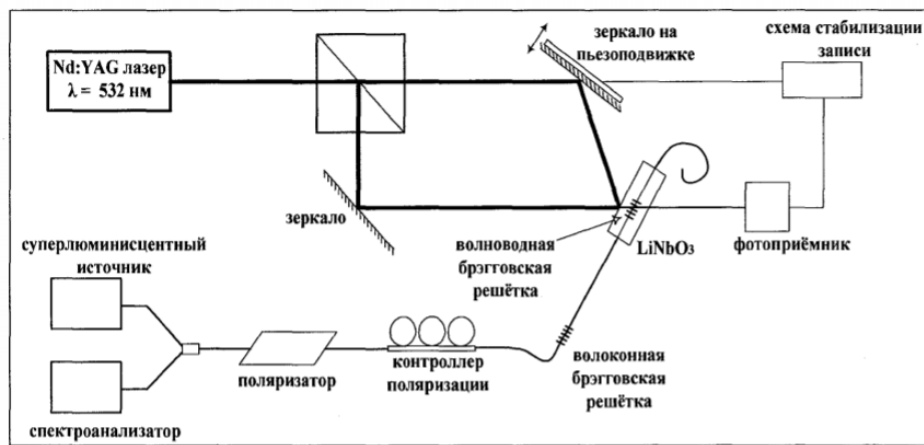


Рис.30 Схема запису бреггівської решітки у хвилевід

Випромінювання YAG: Nd-лазера з допомогою светлороздільного кубика потрапляє на два спеціально відкалєброваних дзеркала, одне з яких встановлено на п'єзорухливій платформі. Це дає можливість, подаючи на п'єзоплатформу сигнали зі схеми стабілізації, підлаштовувати положення дзеркала для забезпечення якісного запису. Відповідного налаштування дзеркал вдалося домогтися формуванням решітки з довжиною хвилі відбивання близькою до 1540 нм.

Стан записуваної решітки спостерігалось по інтенсивності зворотнього відбивання. Для цього випромінювання від суперлюмінісцентного джерела Superlum SLD-761, через Y-розгалужувач і поляризатор вводилося оптичне волокно і пристикований до нього каналний хвилевід. Виділення потрібної поляризації здійснювалося за допомогою контролера поляризації. Спектр відбитого випромінювання реєструвався на спектроаналізаторів Anritsu MS9710B.

Остаточно сформований фазовий інтерферометричний датчик з волоконної бреггівськими ґратами і ґратами Брегга в кристалі LiNbO<sub>3</sub> показаний на малюнку 31.

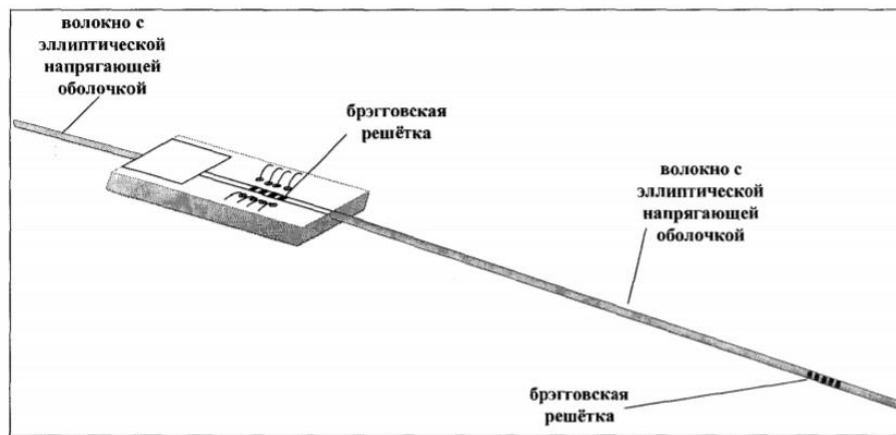
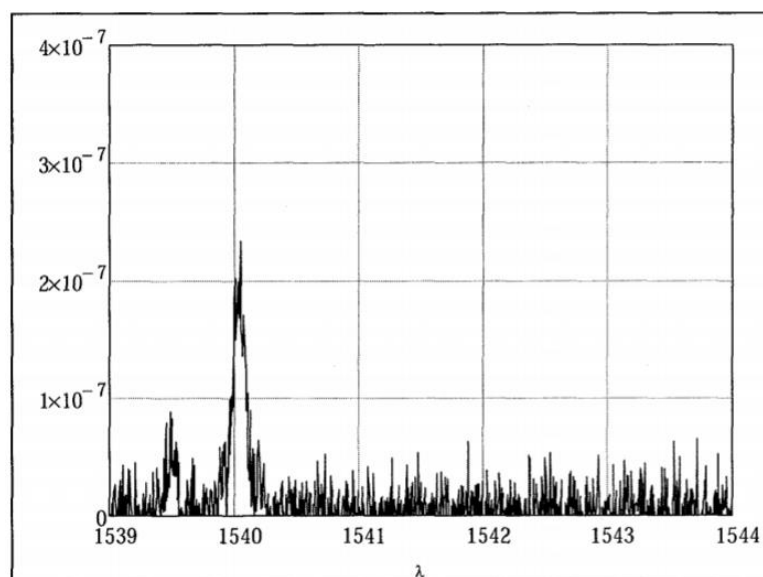


Рис. 32 Кінцевий вид резонатора Фабрі-Перо

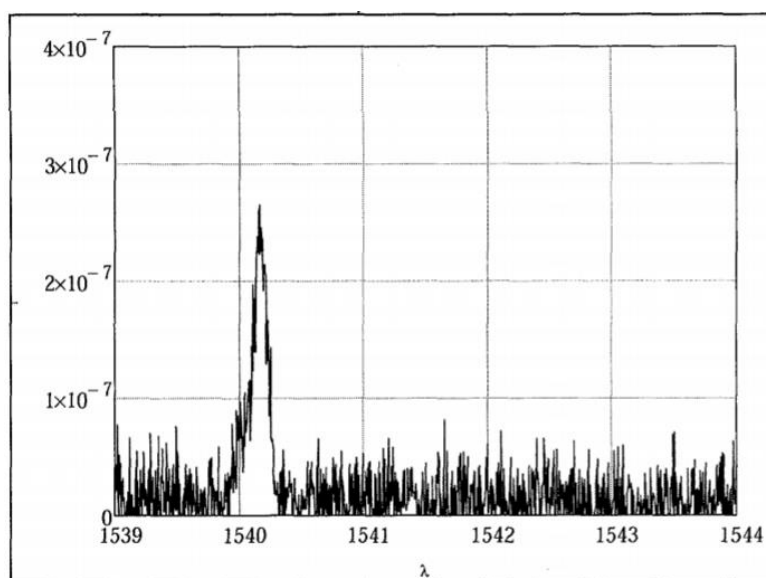
### 3.2. Визначення меж частотної перебудови брегівської решітки в кристалі $\text{LiNbO}_3$

Для того щоб визначити межі зсуву максимуму відбивання решітки, на електроди подавалося зовнішня напруга від спеціального генератора, що дозволяє плавно змінювати напругу в діапазоні від -300 до +300 В.

На рисунку 33 (а, б) показані спектри відбивання записаної решітки при відсутності зовнішнього електричного поля. Ширина спектра становить близько 0.2 нм. Коефіцієнт відбивання - близько 60%. Два піку на довжинах хвиль 1540.05 нм (рис. 33а) і 1540.16 нм (рис.33б) відповідають двом ефективним показникам заломлення у хвилеводі, тобто двом різним станам поляризації відбитого випромінювання.



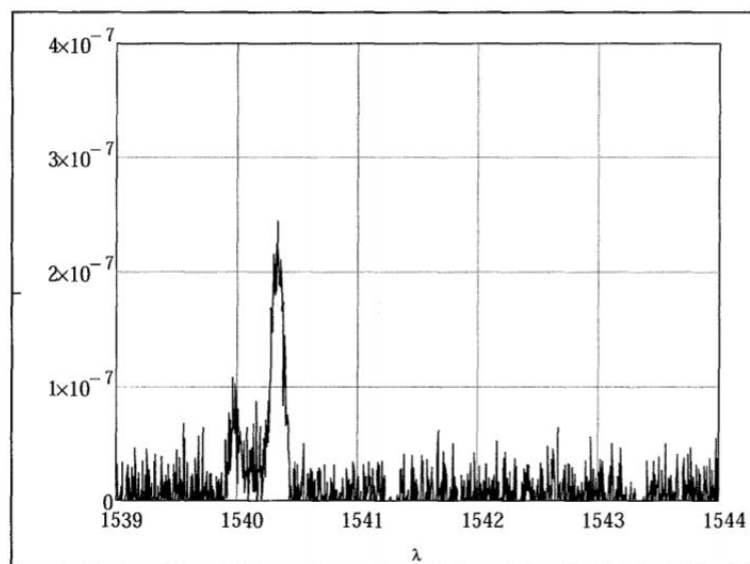
a)



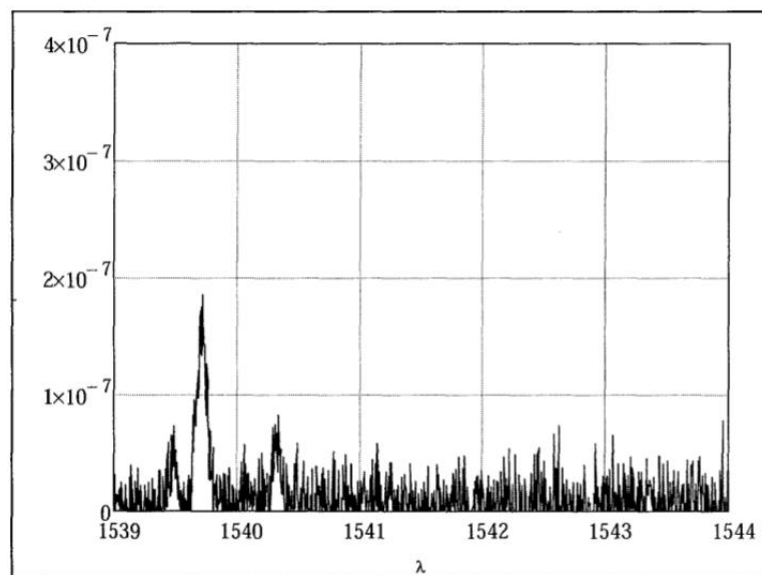
б)

Рис. 33. Спектри відбивання решітки у хвилеводі без поля

При прикладенні зовнішнього електричного поля, як видно з малюнка 34 (а, б), спектри відбивання зміщуються. Для однієї поляризації в разі, якщо на одну групу електродів подано напругу - 300 В, а на іншу +300 В (рис. 34а), пік відбивання доводиться на довжину хвилі 1540.34 нм. Коли поляриність зворотна, то максимум відбивання зміщується на довжину хвилі 1539.72 нм (рис. 34б).



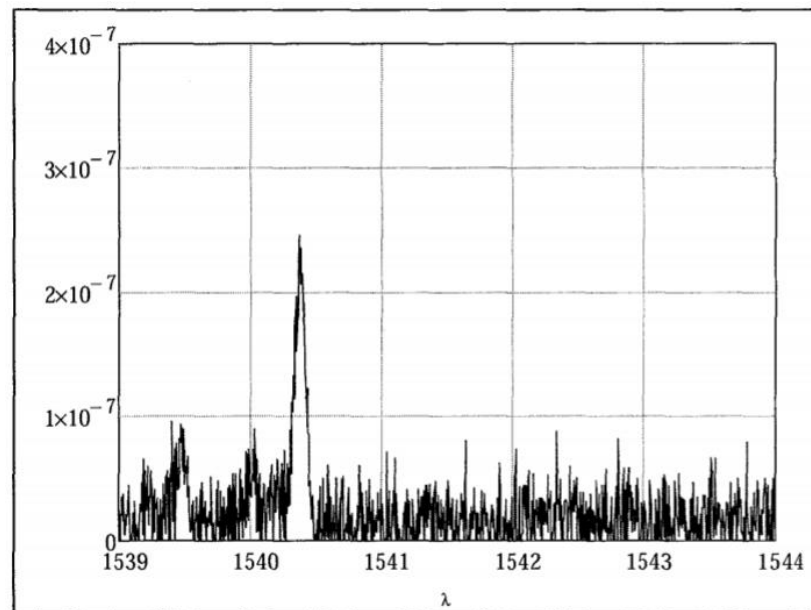
а).



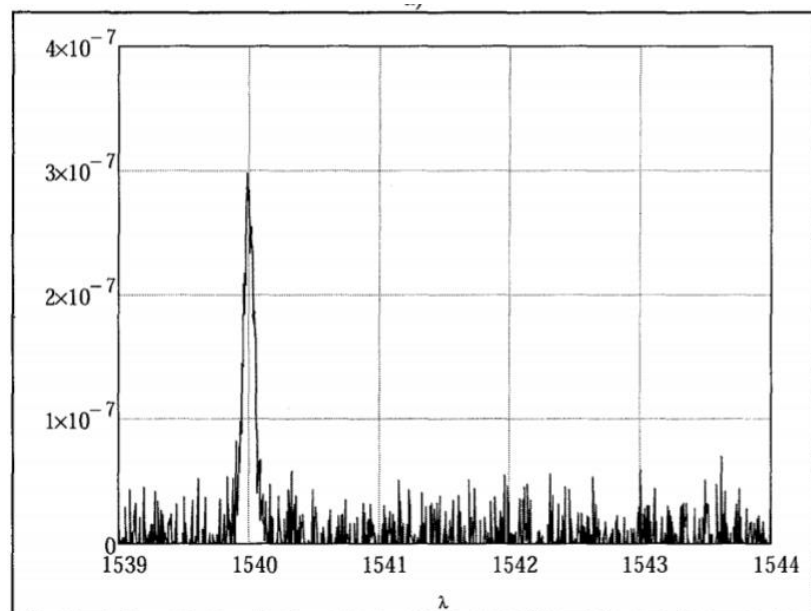
б).

Рис.34 Спектри відбивання решітки у хвилеводі з полем

Для іншої поляризації (рис.35 а, б), якщо на одні контакти подавати - 300 В, а на інші +300 В, то пік відбивання буде відповідати довжині хвилі 1540.39 нм (рис.35а). У разі зворотної полярності пік припадає на 1539.98 нм (рис. 35б)



а)



б)

Рис.35 Спектри відбивання решітки у хвилеводі з полем

Дослідження показало, що при прикладенні зовнішнього електричного поля  $\pm 300\text{В}$ , вдається компенсувати частотний зсув відбивання волоконної бреггівської решітки в межах  $\pm 0.25\text{ нм}$ . Це, в свою чергу, дає можливість здійснити її точну настройку на довжину хвилі відбивання решітки, записаної в оптичному волокні.

### 3.3 Висновки

Запропонована і апробована методика компенсації частотного дрейфу волоконної бреггівської решітки за допомогою впливу електричного поля на решітку Брегга в електрооптичному монокристалі  $\text{LiNbO}_3$ . Дослідження показало, що при прикладені зовнішнього електричного поля  $\pm 300\text{В}$ , вдається компенсувати частотний зсув відбивання волоконної бреггівської решітки в межах  $\pm 0.25\text{ нм}$ . Отримані результати в ході справжніх досліджень лягли в основу діючого макету волоконно-оптичної гідроакустичної антени на бреггівських решітках.

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			54

## РОЗДІЛ IV. МАКЕТ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ ГІДРОАКУСТИЧНОЇ АНТЕНИ НА ОНОВІ БРЕГГІВСЬКИХ РЕШІТОК

### Розділ 4.1. Схема і основні компоненти макету волоконно-оптичної гідроакустичної антени на основі бреггівських решіток.

Принцип роботи одиничного волоконно-оптичного акустичного сенсора на бреггівських решітках в складі діючого макету волоконно оптичної гідроакустичної антени (рис. 36) полягає в наступному. Кожна з бреггівських решіток ВБР1 і ВБР2 датчика відображає імпульс, що надходить на нього від амплітудного модулятора (АМ), на одній і тій же довжині хвилі Брега. При цьому тимчасова затримка між відбитими імпульсами дорівнює подвоєному часу поширення світла в чутливому елементі, поміщеному між ґратами ВБР1 і ВБР2. Відбиті імпульси надходять в Х-розгалуджувач, який, в свою чергу, також роздвоює кожен з них. Затримка, що вноситься при цьому в поширення імпульсу плечем 2 компенсуючого інтерферометра (КІ) по відношенню до плеча 1, забезпечує перекриття в часі імпульсу, викликають зміну розносу фаз інтерферуючих імпульсів. Останнє перетворюється фотоприймачем в зміну величини струму.

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			55



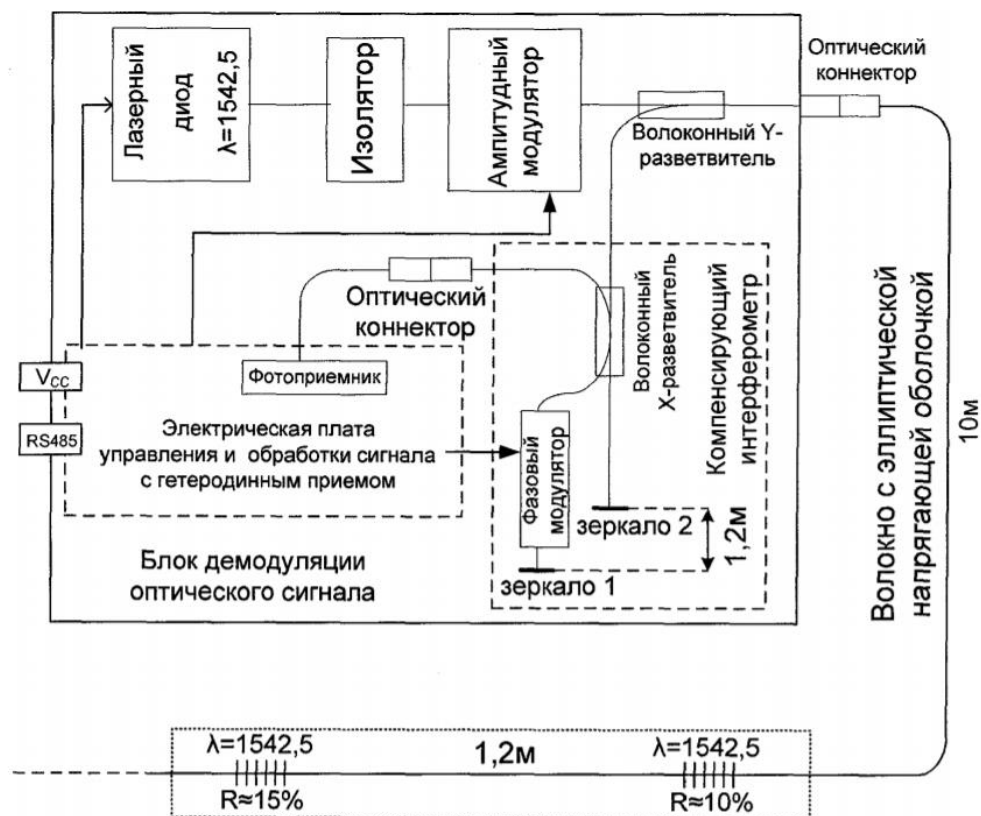


Рис. 36 Схема діючого макету волоконно-оптичної гідроакустичної антени

Для створення масиву датчиків на одному волокні використовується тимчасове (якщо ВБР мають однакову довжину хвилі відбивання) і спектральний ущільнення (поодинокі датчики складаються з ВБР працюють на різних довжинах відбивання). Відстань між двома бреггівськими ґратами становить 1,2 м, а відстань між двома одиночними датчиками складає не менше 3 м.

Реалізація цієї схеми вигляді багатошарової друкованої плати з розташуванням елементів представлена на рисунку нижче.

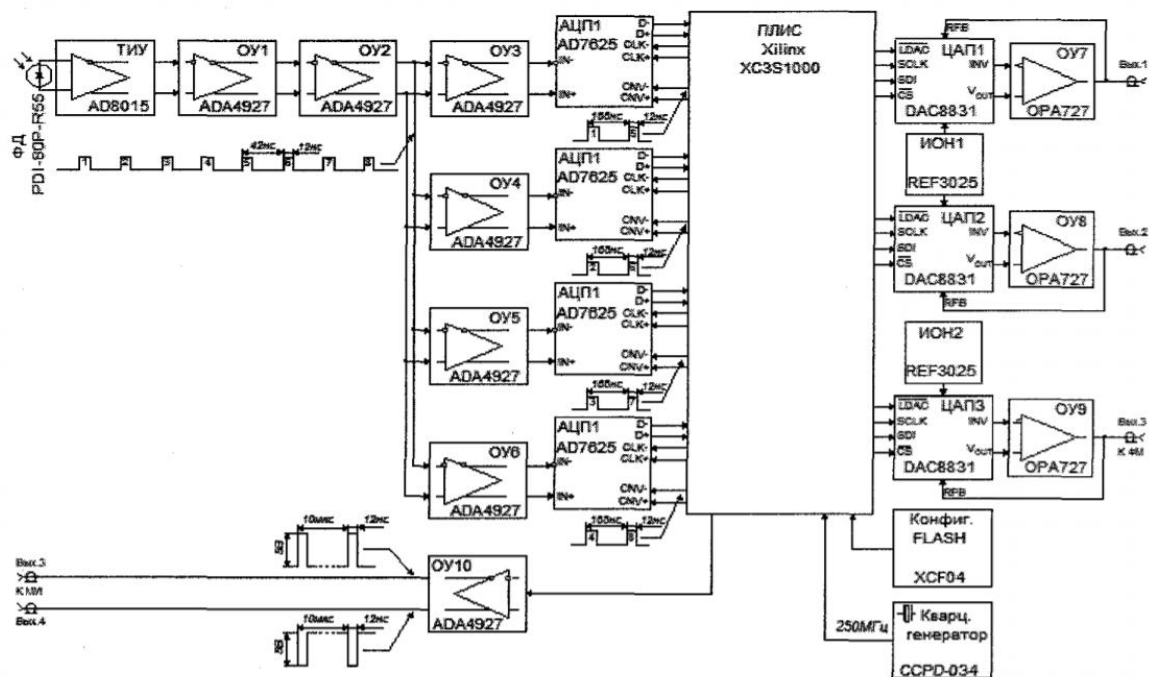


Рис. 37 Структурна схема електронного блоку прийому оптичного випромінювання і первинної обробки акустичного сигналу

Принципова схема ЕП містить фотоприймальний пристрій (ФПУ) на трансімпедансному підсилювачі AD9015, далі три каскаду підсилення на високошвидкісних операційних підсилювачів ADA492, які підсилюють сигнал до  $\pm 4\text{В}$ , величина якого необхідна для подачі на вхід АЦП 7625, щоб використовувати весь динамічний діапазон АЦП.

З виходу АЦП цифровий 16-ти бітний сигнал надходить на входи. ПЛІС «XILINX» XC3S100 містить мільйон вентилів. На ПЛІС проводиться цифрова обробка входящих на вхід ЕП сигналів відповідно до алгоритму обробки представленим в розділі 2.2. роботи. Отриманий на виході ПЛІС оцифрований акустичний сигнал надходить на ЦАП і з виходу на вихідний операційний підсилювач звукових сигналів, на виході якого отримуємо аналоговий звуковий сигнал в смузі 10-500Гц.

ЕП містить високочастотний кварцовий генератор, що задає на частоту 250 МГц, з якої при використанні прямого синтезу в ПЛІС отримуємо з

частотою 100кГц прямокутні імпульси тривалістю 12 нс 120 з можливістю зміни їх тривалості і положення на  $\pm 2$  нс. Крім цих сигналів ПЛІС створює синусоїдальні сигнали з частотою 10 кГц і оцифровані сигнали з частотами 10 і 20 кГц. ПЛІС дозволяє підлаштовувати фази цих сигналів при налаштуванні оптичного модуля і ЕП.

Всі ці сигнали і цифрова обробка здійснюється програмно з використанням пакета прикладних програм для ПЛІС «XILINX».

#### 4.2. Висновок

Результати досліджень показують, що запропонована концепція побудови діючого макету фазового інтерферометричної датчика на бреггівських решітках перспективна і може бути використана для створення буксированих волоконно-оптичних гідроакустичних антен, стаціонарних гідроакустичних кіс і систем віброакустичного моніторингу безпеки стратегічних об'єктів. Подібні системи волоконно-оптичних акустичних сенсорів можуть практично повністю витіснити широко поширені датчики на п'єзокерамічних елементах, основними недоліками яких є складність їх мультиплексування і порівняно великі масогабаритні параметри.

## ВИСНОВКИ

Концепція волоконно оптичних гідрофонів на бреггівських решітках з метою геофізичної розвідки шельфових запасів корисних природних копалин, в тому числі нафти і газу успішно підтвердила свою життєздатність.

					ЗБР.6.050802.051.008 ПЗ	
Змін.		№ документа	Підпис			59

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cranch, GA Large-Scale Multiplexing of Interferometric Fiber-Optic Sensors Using TDM and DWDM / GA Cranch, PJ Nash // Lightwave Technol.- 2001.-№19 (5) .- С. 687.
2. Nash, PJ High-efficiency TDM / WDM architectures for seismic reservoir monitoring / PJ Nash, A. Strudley, R. Crickmore, J. DeFreitas // Proc. SPIE.- 2009.- №7503.-75037Т.
3. Нові розробки буксируваних антен для підводних човнів ВМС США ВМС і кораблебудування // Дайджест зарубіжної преси (за матеріалами зарубіжних джерел) .- Рік випуску 2008 - №51.
4. Nakstad, H. Realisation of a full-scale fibre-optic ocean bottom seismic system / H. Nakstad, JT Kringlebotn // 19th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors, Proc. SPIE.- 2008.- №7004, - С. 288.
5. Kringlebotn, JT Fibre optic ocean bottom seismic cable system- from innovation to commercial success / T. Kringlebotn, H. Nakstad, M. Eriksrud // 20th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors Proc. SPIE.- 2009, - №7503.- С. 277.
6. Shizhuo, Y. Fiber Optic Sensors / Y. Shizhuo, PB Ruffin, TS Francis // 2nd CRC Press, Taylor & Francis Group.- 2008.
7. Hodgson, W. Optimization of Large-Scale Fiber Sensor Arrays Incorporating Multiple Optical Amplifiers - Part I: Signal-to-Noise Ratio Craig / W. Hodgson, JL Wagener, MJF Digonnet, JS Herbert // Journal of Lightwave Technology.- 1998 - №2 (16).

8. Digonnet, MJF Acoustic Fiber Sensor Arrays / MJF Digonnet, BJ Vakoca, CW Hodgson, GS Kino Edward L. // Second European Workshop on Optical Fibre Sensors. Proceedings of SPIE.- 2004.- №5502.- C. 39-50.
  
9. Kersey, AD 64-element timedivision multipled interferometric sensor array with EDFA telemetry. / AD Kersey, A. Dandridge, AR Davis, CK Kirdendall, MJ Marrone, DG Gross // Conference on Optic Fiber Communication, Technical Digest Series.- 1996.-№2.- ThP5.- C.270-271.
  
10. Cranch, AG Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications / AG Cranch, PJ Nash, CK Kirkendall // IEEE Sensors Journal.- 2003 - №1 (3) .- C. 19-30.
  
11. Hodgson, CW Large-scale interferometric fiber sensor arrays with multiple optical amplifiers / CW Hodgson, MJF Digonnet, HJ Shaw // Optics Letters.- 1997 - №21 (22) .- C. 1651-1653.
  
12. Houston, MH Seismic fiber optic multiplexed sensors for exploration and reservoir management / MH Houston // Proceedings of SPIE.-2000- №4202.-C. 31-38.
  
13. Houston MH Fiber optic sensor systems for reservoir fluids management / MH Houston, BNP Paulsson, LC Knauer // OTC1193I, Offshore Technology Conference, Houston - 2000.
  
14. Zhou M. Development of a 32-element fibre optic hydrophone system / Zhou Meng, Yongming Hu, Ming Ni, Shuidong Xiong, Renhe Zhang, Xiuling Li, George Stewart, Fengzhong Dong, Brian Culshaw // Proceedings of SPIE.-2004.- №5589.- C. 114-119.

15. Changsen, S. Multiplexing of fiber-optic acoustic sensors in a Michelson interferometer configuration / Changsen Sun // Optics Letters - 2003 - 12 (28).
  
16. Benjamin, JV A Novel Fiber-Optic Sensor Array Based on the Sagnac Interferometer / Benjamin J. Vakoc, Michel JF Digonnet and Gordon S. Kino.// Journal of Lightwave Technology.- 1999.- №11 (17).
  
17. Digonnet, MJF Acoustic Fiber Sensor Arrays / MJF Digonnet, BJ Vakoca, CW Hodgson, GS Kino Edward L. // Second European Workshop on Optical Fibre Sensors. Proc. SPIE.- 2004, - №5502.
  
18. Zhangqi, S. Research on a novel fiber-optic acoustic / rotation sensor array based on the Sagnac interferometer / Song Zhangqi, Yang Mingye, Zhang Xueliang, Cao Chunyan, Xiong Shuidong // 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. Proc. SPIE.- 2009, - №7503.
  
19. Blin, S. Pickup Suppression in Sagnac-Based Fiber-Optic Acoustic Sensor Array / Stéphane Blin, Michael Bishop, Krishnan Parameswaran, Michel JF Digonnet, Gordon S. Kino // Proc. SPIE.- 2005, - №6004.
  
20. Benjamin, J. Demonstration of a folded Sagnac sensor array immune to polarization-induced signal fading / Benjamin J. Vakoc, Michel JF Digonnet and Gordon S. Kino // Applied Optics.-2003 №36 (42).
  
21. Nicholas, B. Musical instrument recordings made with a fiber Fabry-Perot cavity: photonic guitar pickup / Nicholas Ballard, Daniel Paz-Soldan, Peter Kung, Hans-Peter Loock // Applied Optics.- 2010 - №11 (49). - C. 2198-2203.

22. Hill, KO Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview / KO Hill, G. Meltz // Lightwave Technol.- 1997.- №8 (15) .- C. 1263-1276.
  
23. Yanyu, Z. Fiber Bragg grating coherence spectrum, modeling, simulation and characteristics / Zhao Yanyu, Palais C Joseph // Journal of Lightwave Technol.- 1997 - №1 (15) .- C. 154-161.
  
24. Chen, C. Sensitivity of tilted fiber Bragg grating sensors with different cladding thicknesses / C. Chen, C. Caucheteur, P. Megret, J. Albert, // Proceedings of the 18th Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-18) .- 2006.-TuE31.
  
25. Othonos, A. Fiber Bragg gratings / A. Othonos // Rev. Sci. Instrum.- 1997.- 12 (68) .- C. 4309-4341.
  
26. Kanellopoulos, S. Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated gratings / S. Kanellopoulos, V. Handerek, A. Rogers // Optics Letters.- 1995 року, -№20, -C. 333-335.
  
27. Kashyap, R. Fiber Bragg Gratings / R. Kashyap // San Diego, CA: Academic Press.- 1999 року, -C. 478.
  
28. Yuen, MJ Ultraviolet absorption studies of germanium silicate glasses / MJ Yuen // Appl. Opt- 1982, - №1 (21) .- C. 136-140.
  
29. Dong, L. Ultraviolet absorption in modified chemical vapor deposition performs / L. Dong, J. Pinkstone, P.St.J. Russell, DN Payne // Opt. Soc. Am. B.- 1994.-№10 (11) .- C. 2106-2111.



30. Jackson, JM Preparation effects on the UV optical properties of GeO<sub>2</sub> glasses / JM Jackson, ME Wells, G. Kordas, DL Kinser, RA Weeks, RH Magruder // Appl. Phys.- 1985, - №6 (58) .- 2308-2311.

31. Lemaire, PJ High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibers / PJ Lemaire, RM Atkins, V. Mizrahi, WA Reed // Electron. Lett.-1993-

№29.-C. 1191-1193.

32. Hill, KO Birefringent photosensitivity in monomode optical fiber: Application to the external writing of rocking filters / KO Hill, F. Bilodeau, B. Malo, DC Johnson // Electron. Lett.- 1991.- №27, - C 1548-1550.

33. Tasi, TE Index structure of fiber Bragg gratings in Ge-SiO<sub>2</sub> fibers / TE Tasi, GM Williams, and EJ Friebele // Opt. Lett.- 1997.- №22.- C. 224-226.

34. Poumellic, B. UV induced densification during Bragg grating inscription in Ge: SiO<sub>2</sub> pre-forms / Poumellic, P. Gu 'enot, I. Riant, P. Sansonetti, P. Niay // Opt. Mat.- 1995.- №4.- C. 441 ^ 49.

35. Hill, K. O. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask / KO Hill, B. Malo, F. Bilodeau, DC Johnson, J. Albert // Appl. Phys. Lett.- 1993, -№62, - C. 1035-1037.

36. Hosono, H. Nature and origin of the 5-eV band in SiO<sub>2</sub>: GeO<sub>2</sub> glasses / H. Hosono, Y. Abe, DL Kinser, Y. Abe, DL Kinser, RA Weeks, K. Muta, H. Kawazoe // Phys . Rev. B.- 1995.-№46, - C.445-451.

37. Hosono, H. Nature and origin of the 5-eV band in SiO<sub>2</sub>: GeO<sub>2</sub> glasses / H. Hosono, Y. Abe, DL Kinser, RA Weeks, K. Muta, H. Kawazoe // Phys. Rev. B.- 1992 року, -№18 (46) .- С. 11445-11451.

38. Неуструев, В.Б. Електрострикційних механізм утворення бреггівськими решітки в германосілікатних световодах / В.Б. Неуструев // Квантова електроніка.-2001 № 11 (31) .- С. 1003-1006.

39. Bilodeau, F. Photosensitization of optical fiber and silica-on-silicon / silica waveguides / F. Bilodeau, B. Malo, A. Albert, DC Johnson, KO Hill, Y. Hibino, M. Abe, M. Kawachi // Opt . Lett- +1993, -№12 (18) .- С. 953-955.

40. Pal, S. Bragg gratings written in Sn-Er-Ge-codoped silica fiber: investigation of photosensitivity, thermal stability, and sensing potential / S. Pal, T. Sun, KT Grattan, SA Wade, SF Collins, GW Baxter, B . Dussardier, GJ Monnom // Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.- 2004, - №8.- С. 1503-1511.

41. Васильєв, С.А Волоконні решітки показника заломлення і їх застосування / С.А. Васильєв, О. І. Медведков, І.Г. Корольов, А.С. Божков, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантова електроніка- 2005.-№12 (35) .- С.

1085-1103.

42. Othonos, A. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunication and Settings / A. Othonos, K. Kalli // Norwood, Mass .: Artech House.-1999 С. 149-154.

43. Askins, CG Fiber Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse / CG Askins, T.C. Tsai, GM Williams, MA Putnam, M. Bashkansky, EJ Friebele // Optics Letters.- 1992.- №17.- C. 833-835.
  
44. Askins, CG Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower / CG Askins, MA Putnam, GM Williams, EJ Friebele // Optics Letters.- 1994.-№19.- C. 147-149.
  
45. Lindner, E. Thermal regeneration of fiber Bragg gratings in photosensitive fibers / E. Lindner, C. Chojetzki, S. Brueckner, M. Becker, M. Rothhardt, H. Bartelt // Opt. Expr.- 2009.- №17.- C. 12523-12531.
  
46. Erdogan, T. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings / T. Erdogan, V. Mizrahi, PJ Lemaire, D. Monroe // Appl. Phys.- 1994.- №76.- C. 73-80.
  
47. Malo, B. Point-by-point fabrication of micro-Bragg gratings in photosensitive fiber using single excimer pulse refractive index modification techniques / B. Malo, KO Hill, F. Bilodeau, DC Johnson, J. Albert // Electron.Lett- 1993.-№29, -C. 1668-1669.
  
48. Okawara, C. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with time division multiplexing / C. Okawara and K. Saijyou // Acoust. Sci. & Tech.- 2007.-№1 (28).
  
49. Crunelle C. Quasi-distributed temperature sensor combining Fiber Bragg Gratings and temporal reflectometry technique interrogation / C. Crunelle, C. Caucheteur, M. Wuilpart, P. Megret // Optics and Lasers in Engineering.- 2009.- №47.-C . 412-418.

50. Bilodeau, F. An all-fiber dense-wavelength-division multiplexer / demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings / F. Bilodeau, DC Johnson, S. Theriault, B. Malo, J. Albert, KO Hill // IEEE Photon. Technol. Lett.- 1995.- №7- C. 388-390.

51. Baumann, J. Compact all-fiber add-drop-multiplexer using fiber Bragg gratings / J. Baumann, J. Seifert, W. Nowak, M. Sauer // IEEE Photon. Technol. Lett.- 1996.-№8.-C. 1331-1333.

52. Tanaka, S. Fiber Bragg grating hydrophone array using multi-wavelength laser: simultaneous multipoint underwater acoustic detection / S. Tanaka, A. Wada, N. Takahashi // Proc. SPIE.- 2009.- №7503.

53. Okawara, C. Fiber optic FBG interferometric hydrophone array using TDM and WDM / C. Okawara, H. Himamura, M. Nakata, H. Uchida // Technical Report.-

2006.-№6936.-C. 13.

54. Meltz, G. Overview of fiber grating-based sensors / G. Meltz // Proc. SPIE, Distributed and Multiplexed Sensors VI.- 1996 roky, - №2838.- C.2-23.

55. Kersey, D. Progress toward the development of practical fiber Bragg grating instrumentation systems / D. Kersey, MA Davis, TA Berkoff, DG Bellemore, KP Koo, RT Jones // Proc. SPIE, Fiber Optic and Laser Sensors XIV.- 1996.-

№2839.- C.40-64.

56. Morey, WW Recent advances in fiber grating sensors for utility industry applications / WW Morey, G. Meltz, JM Weiss // Proc. SPIE, Self Calibrated Intelligent Optical Sensors and Systems.- 1995 року, -№2594, - С. 90-98.
  
57. Okawara, C. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with wavelength division multiplexing / C. Okawara, K.Saijyou // Acoust. Sci. & Tech.- 2008.- №3 (29).
  
58. Okawara, C. Fiber optic interferometric hydrophone using fiber Bragg grating with time division multiplexing / C. Okawara, K.Saijyou // Acoust. Sci. & Tech.-2007, -№1 (28).
  
59. Shih-Chu, H. Modified phase-generated carrier demodulation compensated for the propagation delay of the fiber / H. Shih-Chu, H. Lin // Applied Optics.- 2007.-№31 (46).
  
60. Пат. US 5212825 Сполучені Штати Америки. Synthetic Heterodyne Demodulator Circuit / Michael R. Layton - 1993.
  
61. Hill, DJ Gain in hydrostatic pressure sensitivity of coated fibre Bragg grating / DJHill GACranch // Electronics letters.- 1999.- №15 (35).
  
62. Hocker, GB Fiber optic acoustic sensors with composite structure: an analysis / GB Hocker // Applied Optics.- 1979.- №21 (18).
  
63. Budiansky B. Pressure sensitivity of clad optical fiber / B. Budiansky, DC Drucker, GS Kino, JR Rice //, Applied Optics.- 1979.- №24 (18).

64. Удд, Е. Волоконно оптичні датчики. Вступний курс для інженерів і науковців / Е Удд // Техносфера - Рік випуску 2008 - С. 520.
65. Ярив, А. Оптичні хвилі в кристалах / А. Ярив, П. Юх, // Мир 1987, -С. 616.
66. Hughes, R. Static pressure sensitivity amplification in interferometric fiberoptic hydrophones / R.Hughes, J.Jarzynski // Applied Optics.- 1980, - №1 (19).
67. Kuei-Chu, H. Fiber Bragg grating sequential UV-writing method with realtime interferometric side-diffraction position monitoring / Kuei-Chu Hsu, Lih-Gen Sheu, Kai-Ping Chuang Shu-Hui Chang, Yinchieh Lai // Optics Express.- 2005, -  
-  
№10 (13).
68. Ahn, JT Fiber-optic sensor array without polarization-induced signal fading / JT Ahn, BY Kim // Optics Letters.- 1995.- №4 (20).
69. Kersey, AD Polarization diversity detection for fiber interferometers using active feedback control of output polarization-mode selection / AD Kersey, MJ Marrone, A. Dandridge // Optics Letters.- 1990, - 22 (15).
70. Дукельский, К.В. Тонкі анізотропні одномодові волоконні світловоди з еліптичної напружує оболонкою / К.В. Дукельский, М.А. Ероньян, А.В. Комаров, Ю.Н. Кондратьев, Є.І. Ромашова, М.М. Серков, А.В. Хохлов // Оптичний журнал, - 2000, - №10 (57) .- С. 104-106.

71. Бурі, С.В. Технологія великогабаритних заготовок анізотропних одномодових світловодів з еліптичної оболонкою / С.В. Бурі, К.В. Дукельський, М.А. Ероньян, П.А. Злобін, А.В. Комаров, Л.Г. Левіт, В.І. Страхов, А.В. Хохлов // Оптичний журнал 2007.- 4 (74) .- С. 85-87.
  
72. Mitomi, O. High-Speed LiNbO<sub>3</sub> Optical Modulators / O. Mitomi // Taylor and Francis Group.- 1999.- 5 (12) .- С. 815-940.
  
73. Haijun, Q. Ultraviolet photorefractivity features in doped lithium niobate crystals / Q. Haijun, X. Jingjun, Z. Guoquan, Z. Xinzheng, S. Qian, Z. Guangyin // Physical Review.- 2004, - №70.- С . 94-101.
  
74. Volk, T. Lithium Niobate Defects, Photorefractive and Ferroelectric Switching / T. Volk, M. Wohlecke // Springer Series in Material Science.- 2008.- №115.
  
75. Петров, М.П. Електрично керований інтегрально-оптичний фільтр / М.П. Петров, А.В. Шамрай, А.С.Козлов, І.В. Іллічов, // Листи в ЖТФ - 2004.- №3 (30) .- С. 75-81.